

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО
«___» _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»**

зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

**на тему: «Ультразвуковий засіб технологічного контролю поверхневої
густини тканин»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПН-91мп
Палій Богдан Максимович _____

Керівник:

Професор, д.т.н., професор
Здоренко Валерій Георгійович _____

Консультант з Розроблення стартап-проекту:

Доцент, д.е.н.,
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Консультант із нормоконтролю:

Доцент к.т.н.,
Божко Костянтин Михайлович _____

Рецензент:

д.т.н., професор
Протасов Анатолій Георгійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології
екологічної безпеки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Палію Богдану Максимовичу

1. Тема дисертації «Ультразвуковий засіб технологічного контролю поверхневої густини тканин», науковий керівник дисертації Здоренко Валерій Георгійович професор, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2020 р. № _____
2. Строк подання студентом дисертації «7» грудня 2020 р.
3. Об'єкт дослідження: процес безконтактного ультразвукового контролю поверхневої густини тканин.
4. Предмет дослідження: розробка ультразвукового пристрою для оперативного технологічного вимірювання поверхневої густини тканин.
5. Перелік питань, які мають бути досліджені
 - 5.1 Теоретичні та експериментальні дослідження:
 - 5.1.1. Провести аналітичне дослідження методів та засобів контролю поверхневої густини тканин.
 - 5.1.2. Провести аналітичне дослідження розповсюдження ультразвуку в тканинах.
 - 5.1.3. Провести аналітичне дослідження проходження безперервного ультразвукового сигналу крізь тканину, що контролюється, і відбиття від неї з урахуванням згасання
 - 5.1.4. Провести дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину
 - 5.1.5. Розробити структурну схему ультразвукового засобу технологічного контролю поверхневої густини тканин та провести аналіз його роботи.
 - 5.1.6 Виконати експериментальні дослідження контролю поверхневої густини тканин.

5.1.7. Порівняти отримані результати вимірювання поверхневої густини тканин ультразвуковим безконтактним засобом технологічного контролю та ваговим методом.

5.1.8 Висновки. Презентація.

5.1.9 Стартап-проект за темою дисертації.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу на захист дисертації.

6.1 Класифікація безконтактних методів вимірювання поверхневої густини тканин.

6.2 Класифікація ультразвукових безконтактних методів вимірювання поверхневої густини тканин.

6.3 Аналіз проходження ультразвукового сигналу крізь тканину, яка контролюється, та відбиття від неї з урахуванням згасання.

6.4. Структурна схема ультразвукового засобу технологічного контролю поверхневої густини тканин.

6.5. Результати експериментальних досліджень

7. Орієнтовний перелік публікацій:

7.1 Одна теза доповіді на міжнародних конференціях в Україні або за кордоном.

8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНІН	Здоренко В. Г. професор, д.т.н., професор	05.10.20 20 р.	
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНІН	Здоренко В. Г. професор, д.т.н., професор	20.10.20 20 р.	
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ	Здоренко В. Г. професор, д.т.н., професор	15.11.20 20 р	
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНІН»	Бояринова Катерина Олександрівна доцент, д.е.н.	30.11.20 20 р.	

9. Дата видачі завдання «10» вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Провести аналітичне дослідження методів та засобів контролю поверхневої густини тканин.	05.10.2020 р.	
2	Провести аналітичне дослідження розповсюдження ультразвуку в тканинах	14.10.2020 р.	
3	Провести аналітичне дослідження проходження ультразвукового сигналу крізь тканину, що контролюється, і відбиття від неї з урахуванням згасання	18.10.2020 р.	
4	Провести дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину	20.10.2020 р.	
5	Розробити структурну схему ультразвукового засобу технологічного контролю поверхневої густини тканин та провести аналіз його роботи.	20.10.2020 р.	
6	Виконати експериментальні дослідження контролю поверхневої густини тканин, визначити вірогідність контролю поверхневої густини тканин.	27.10.2020 р.	
7	Порівняти отримані результати вимірювання поверхневої густини тканин ультразвуковим безконтактним засобом технологічного контролю та ваговим методом.	15.11.2020 р.	
8	Висновки.	25.11.2020 р.	
9	Презентація.	25.11.2020 р.	
10	Стартап-проект за темою дисертації.	30.11.2020 р.	

Студент

Богдан ПАЛІЙ

Науковий керівник

Валерій ЗДОРЕНКО

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить пояснювальну записку на ____ сторінках формату А4, ____ ілюстрацій, ____ таблиць, ____ літературних джерела.

В даній магістерській дисертаційній роботі проведено аналітичне дослідження ультразвукового засобу технологічного контролю поверхневої густини тканин. Проведений аналіз показав, що для забезпечення випуску якісних тканин необхідно проведення оперативного технологічного контролю їх поверхневої густини. В теперішній час застосовуються переважно руйнівні контактні методи контролю поверхневої густини тканин, які засновані на вирізанні та зважуванні зразків тканин, тоді як безконтактні не використовуються хоча мають ряд суттєвих переваг у порівнянні з контактними. Як показав проведений у першому розділі дисертації аналіз, для оперативного технологічного контролю поверхневої густини тканин, доцільним є застосування ультразвукових методів контролю.

У другому розділі дисертації розглянуті особливості розповсюдження ультразвукових хвиль в тканинах, які пов'язані з розмірами пор та іншими структурними показниками тканин, які впливають на проходження ультразвукових хвиль скрізь тканину та відбиття від неї. Проведено дослідження проходження ультразвукової хвилі крізь контрольовані тканини з різними розмірами пор і відбиття від них та отримані аналітичні залежності для розрахунку та аналізу взаємодії ультразвукових хвиль з нитками тканин з різними акустичними опорами. Отримано аналітичні залежності, які пов'язують амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль як із зміною самих діаметрів ниток основи та утоку, так і безпосередньо з поверхневою густиною тканини. Доведено, що згасанням ультразвукових коливань для більшості тканин можна знехтувати, а вибором співвідношення об'ємної густини тканини та довжиною ультразвукової хвилі в тканині можна знизити вплив згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль.

Показано, що при збільшенні тривалості ультразвукового імпульсного

сигналу зменшуються амплітудна та фазова похибки в порівнянні з безперервним сигналом. Тому необхідно вибирати тривалість ультразвукового імпульсного сигналу такою, щоб не відбувалось перевідбиттів ультразвукових хвиль від поверхні тканини та поверхонь п'єзоперетворювачів.

В третьому проведена розробка ультразвукового засобу технологічного контролю поверхневої густини тканин та його експериментальні дослідження. Показано що для визначення поверхневої густини тканин не потрібно знати її об'ємну густину, а виключити вплив зміни структурних показників та пористості можливо за зміною амплітуди ультразвукового сигналу, який відбивається. Отримані аналітичні вирази, які зв'язують амплітудні співвідношення ультразвукового сигналу з поверхневою густиною тканин. Визначені амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, які взаємодіють з контрольованими тканинами. Значення поверхневої густини зразків тканин, які визначались ультразвуковим засобом технологічного контролю, перевірялись за допомогою вагового методу та взірцевих електронних вагах. Зважування зразків з площею $S = 0,01 \text{ м}^2$ (однаковою для всіх зразків тканин) проводилися на електронних вагах ТВЕ – 021 з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta = 0,001 \text{ г}$. Визначені відносні похибки вимірювання поверхневої густини тканин в діапазоні $100 - 450 \text{ г/м}^2$ для 11 тканин різних артикулів. При цьому відносна похибка вимірювання не перевищувала $\pm 3\%$. Проведена оцінка вірогідності контролю, яка склала 0,975. Також визначені додаткові похибки вимірювання поверхневої густини тканин: при зміні куту нахилу тканини в межах від 0° до 10° – не більше $\pm 0,6\%$, а при зміні температури навколишнього середовища в діапазоні від 20°C до 40°C – не більше $\pm 0,8\%$.

Ключові слова: поверхнева густина тканин, безконтактний контроль, ультразвукова хвиля, коефіцієнти проходження та відбиття, похибка вимірювання.

ABSTRACT

The master's dissertation contains an explanatory note on ____ A4 pages, ____ illustrations, ____ tables, ____ literature sources.

In this master's dissertation an analytical study of the ultrasonic means of technological control of tissue surface density. The analysis showed that to ensure the release of quality fabrics it is necessary to carry out operational technological control of their surface density. Currently, mainly destructive contact methods of tissue surface density control are used, which are based on cutting and weighing tissue samples, while non-contact ones are not used, although they have a number of significant advantages over contact ones. As shown by the analysis conducted in the first section of the dissertation, for the operational technological control of tissue surface density, it is advisable to use ultrasonic control methods.

The second section of the dissertation discusses the peculiarities of the propagation of ultrasonic waves in tissues, which are related to the pore size and other structural parameters of tissues that affect the passage of ultrasonic waves through the tissue and reflection from it. A study of the passage of ultrasonic waves through controlled tissues with different pore sizes and reflections from them and obtained analytical dependences for the calculation and analysis of the interaction of ultrasonic waves with tissue threads with different acoustic resistances. Analytical dependences are obtained, which relate the amplitude ratios of ultrasonic waves both with the change of the diameters of the warp and weft threads, and directly with the surface density of the fabric. It has been shown that the attenuation of ultrasonic vibrations can be neglected for most tissues, and the choice of the ratio of the bulk density of the tissue and the length of the ultrasonic wave in the fabric can reduce the effect of attenuation on the amplitude ratio of ultrasonic waves.

It is shown that as the duration of the ultrasonic pulse signal increases, the amplitude and phase errors decrease in comparison with the continuous signal. Therefore, it is necessary to choose the duration of the ultrasonic pulse signal so that

there are no reflections of ultrasonic waves from the surface of the fabric and the surfaces of the piezoelectric transducers.

In the third development of ultrasonic means of technological control of surface density of fabrics and its experimental researches is carried out. It is shown that to determine the surface density of tissues, it is not necessary to know its bulk density, and to exclude the influence of changes in structural parameters and porosity is possible by changing the amplitude of the ultrasonic signal that is reflected. Analytical expressions are obtained that relate the amplitude ratios of the ultrasonic signal to the surface density of tissues. The amplitude ratios of ultrasonic waves that interact with controlled tissues are determined. The values of the surface density of tissue samples, which were determined by ultrasonic means of technological control, were checked using the weighing method and sample electronic scales. Weighing of samples with an area $S = 0,01 \text{ m}^2$ (the same for all tissue samples) was performed on electronic scales TVE - 021 with an absolute measurement $\Delta = 0,001 \text{ g}$. The relative errors of measuring the surface density of tissues in the range of $100 - 450 \text{ g / m}^2$ for 11 tissues articles. The relative measurement error did not exceed $\pm 3\%$. An estimate of the probability of control, which amounted to 0,975. Additional errors of measurement of surface density of fabrics are also defined: at change of an angle of inclination of fabric within 0° to 10° - no more than $\pm 0,6\%$, and at change of ambient temperature in the range from 20°C to 40°C - no more than $\pm 0,8 \%$.

Key words: tissue surface density, non - contact control, ultrasonic wave, transmission and reflection coefficients, measurement error.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН	14
1.1. Вимірювання поверхневої густини тканин за допомогою стандартних методів та технічних засобів.....	14
1.2. Безконтактні методи та засоби вимірювання поверхневої густини тканин	16
1.2.1. Оптичні методи та засоби вимірювання	18
1.2.2. Радіохвильові методи та засоби вимірювання	21
1.2.3. Радіоізотопні методи та засоби вимірювання	25
1.2.4. Ємнісні методи та засоби вимірювання.....	28
1.2.5. Пневматичні методи та засоби вимірювання	30
1.2.6. Ультразвукові методи та засоби вимірювання.....	33
Висновки до розділу 1	39
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН	40
2.1. Дослідження розповсюдження ультразвуку в тканинах	40
2.2. Аналіз проходження безперервного ультразвукового сигналу крізь тканину, що контролюється, і відбиття від неї з урахуванням згасання	51
2.3. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину.....	71
2.4. Визначення зміни пористості тканини за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі.....	79
Висновки до розділу 2	84
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ	85
3.1. Розробка ультразвукового засобу контролю поверхневої густини.....	85
3.2. Визначення чутливості зміни амплітуди ультразвукової хвилі до зміни поверхневої густини тканини	91
3.3. Експериментальна установка для вимірювання поверхневої густини тканин.....	96
Висновки до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН»	110

4.1 Опис ідеї.....	111
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	113
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	114
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	121
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	123
Висновки до розділу 4	126
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
Додаток А.....	137
Додаток Б	142

ВСТУП

Однією з найважливіших задач для підприємств легкої промисловості є підвищення якості продукції та її конкурентоспроможності. Одним з основних технологічних параметрів, за яким визначають як споживчі властивості, так і фізико-механічні характеристики тканин, є їх поверхнева густина, яка визначає жорсткість, формостійкість, гігроскопічність, ергономічність, теплозахисні властивості тканин та можливість проходження крізь них газів і рідин. Поверхнева густина є важливим показником при проектуванні тканин різного цільового призначення. Крім того, поверхнева густина тканин, з яких виготовлені елементи одягу, впливає на зручність при носінні, функціональні можливості та естетичний вигляд, що є визначальним для споживача у виборі одягу.

Необхідність проведення вимірювання поверхневої густини викликана потребою зниження відсотку браку за рахунок виключення можливості випуску тканин, поверхнева густина яких виходить за межі регламентованих допусків. Забезпечити належну поверхневу густину тканин на виробництві можливо тільки за допомогою безперервного оперативного технологічного контролю. Це підвищить якість виготовлених тканин та економічну ефективність у текстильній промисловості.

Актуальність теми магістерської дипломної роботи викликана тим, що на сьогоднішній день поверхневу густину тканин визначають ваговим методом з вирізанням зразків та наступним зважуванням у лабораторії, що не дає можливості проводити оперативний технологічний контроль безпосередньо в процесі виробництва.

Тому розробка ультразвукового методу оперативного технологічного контролю поверхневої густини тканин є актуальною проблемою, вирішення якої дасть можливість підвищити якість та конкурентоспроможність готової продукції.

Метою дипломної магістерської роботи є дослідження та розробка

безконтактного ультразвукового пристрою для оперативного технологічного контролю поверхневої густини тканин.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- провести загальний аналіз методів та засобів контролю поверхневої густини тканин та обґрунтувати вибір методу неруйнівного контролю;
- отримати аналітичні залежності, які пов'язуватимуть амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль як із зміною самих діаметрів ниток основи та утку, так і безпосередньо з поверхневою густиною тканини;
- дослідити вплив згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, які пройшли скрізь тканину та відбилися від її поверхні;
- отримати залежності амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу, якій пройшов крізь контрольовану тканину, від поточного значення поверхневої густини;
- розробити ультразвуковий метод контролю поверхневої густини з виключенням впливу показників структури, об'ємної густини та пористості тканин на результати вимірювань;
- розробити ультразвуковий пристрій контролю поверхневої густини тканин з можливістю підключення його до інших вимірювальних засобів для проведення дослідження та розширеного контролю поверхневої густини різних тканин безконтактним методом;
- провести порівняльний аналіз між вимірюваними значеннями поверхневої густини контрольованої тканини, отриманими за допомогою ультразвукової експериментальної установки та із застосуванням стандартного метода.

Об'єкт дослідження – процес безконтактного ультразвукового контролю поверхневої густини тканин.

Предмет дослідження – розробка ультразвукового пристрою для оперативного технологічного вимірювання поверхневої густини тканин.

Методи дослідження – теорія розповсюдження та відбиття ультразвукових хвиль в однорідному середовищі та в багатошаровому

середовищі із складною структурою, до якого можна віднести переважну більшість тканин; теорія вірогідності; математичне моделювання; диференціальне та інтегральне обчислення; математична статистика.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН

На сьогоднішній день в текстильній промисловості збільшується обсяг виготовлених тканин, а визначення фактичної поверхневої густини, яка є одним з основних технологічних параметрів, за яким визначають як споживчі властивості, так і фізико-механічні характеристики тканин, проводиться згідно методів вимірювання лінійних розмірів довжини, ширини зразка тканини та подальшого його зважування. При цьому необхідно вирізати зразок, порушуючи цілісність полотна та знижуючи сортність тканини. Зазначені методи не дають змоги вести безперервний оперативний технологічний контроль у порівнянні з безконтактними методами, які можуть дозволити контролювати необхідний параметр безпосередньо в процесі виробництва.

1.1. Вимірювання поверхневої густини тканин за допомогою стандартних методів та технічних засобів

Згідно ГОСТ 3811 – 72 “Материалы текстильные. Ткани, нетканые полотна и штучные изделия. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотностей” фактичну поверхневу густину визначають, спочатку при вимірах ширини та довжини вирізаного зразка тканини, а потім, зваживши його. При цьому зразок тканини перед випробуваннями намагаються піддати релаксації та кондиціонувати в стандартних кліматичних умовах згідно ГОСТ 10681–75. Після усіх перерахованих дій визначають поверхневу густину самої тканини за формулою:

$$\eta = \frac{m}{L \cdot B} = \frac{m}{S_{зр.}}, \quad (1.1)$$

де η – поверхнева густина зразка тканини, що зважується;

L, B, m – середня довжина, середня ширина та відповідно маса зразка тканини, що зважується, після релаксації при кліматичних умовах згідно ГОСТ 10681–75;

$S_{зр.}$ – площа зразка тканини.

У стандарті зазначено методи визначення поверхневої густини η в залежності від необхідності проведення тих чи інших випробувань з більшою чи меншою точністю. Вимірювання довжини та ширини зразка тканини проводиться за допомогою горизонтального мірального столу та металевої лінійки, яка проградуєвана в сантиметрах та в міліметрах з ціною найменшої поділки 1мм. Вимірювання маси методами, зазначеними в стандарті, проводиться за допомогою ваг з відносною похибкою до $\pm 0,2\%$ від виміряної величини та ваг з абсолютною похибкою до $\pm 0,001\text{г}$.

Якщо тканина має нерівномірну вологість на ділянках своєї поверхні, то її розміщують в середовищі при кліматичних умовах з відносною вологістю 10% з температурою, яка не повинна перевищувати 50°C . Потім тканину кондиціонують доки її вологість не стане рівномірною.

Під час проектування тканин [1-10] поверхневу густину η визначають розрахунковим методом, тобто при проектуванні тканин на виробництві поверхневу густину η можуть як визначати, так і задавати розрахунковим методом. Неврахування згинання ниток корегують коефіцієнтами, а допустимий урбіток тканин [9] – величиною, що враховує його. Визначення поверхневої густини η розрахунковим методом здійснюється з використанням стандартних показників густини Π_o, Π_y (кількість ниток основи та утку відповідно на 0,1 м тканини) та лінійної густини ниток основи та утку T_o, T_y (текс) і виражається формулою:

$$\eta = 0,01 \cdot (\Pi_o T_o + \Pi_y T_y) \cdot k, \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт, який враховує згинання ниток при переплетінні їх в тканині.

При розрахунку, який дає більшу точність в кінцевому результаті, залежність поверхневої густини η можна записати як:

$$\eta = 0,01 \cdot \left(\frac{P_o T_o \cdot \left(1 + \frac{\chi}{100 \%} \right)}{\left(1 - \frac{a_o}{100 \%} \right)} + \frac{P_y T_y}{\left(1 - \frac{a_y}{100 \%} \right)} \right) \cdot k \cdot \mu, \quad (1.3)$$

де a_o, a_y – показники, які показують у відсотках урбіток ниток основи та утку відповідно;

χ – відсоток шліхти в тканині;

μ – коефіцієнт, який враховує зміну маси тканини в процесах обробки.

Незважаючи на те, що кінцевою метою цього методу є створення тканин із заданою поверхневою щільністю, фактичне значення цього параметру може відрізнятись на певну величину $\Delta\eta$ [11].

Таким чином, основним недоліком вище зазначених методів є те, що для визначення фактичної поверхневої густини в процесі виробництва та для покращення якості готової продукції необхідно вести безперервний оперативний технологічний контроль, забезпечити який за допомогою методу вирізання і зважування зразків в лабораторії та розрахункового методу неможливо.

1.2. Безконтактні методи та засоби вимірювання поверхневої густини тканин

Одними з найбільш перспективних методів контролю є безконтактні. Перевага безконтактних методів – це відсутність механічного контакту контактних перетворювачів [12 - 15] з поверхнею контрольованої тканини.

Це дозволяє виключити похибки, які пов'язані з вимірюванням маси тканини контактним способом [14-15], а також і ті, що виникають при вимірюванні довжини та ширини тканини з наступним розрахунком самої поверхневої густини η .

Іншою перевагою таких методів є можливість не пошкоджувати цілісність самого полотна контрольованої тканини та проводити безперервний оперативний технологічний контроль на виробництві, а не тільки вести його точково за зразками досліджуваних тканин в лабораторії.

На рис. 1.1 представлена класифікація безконтактних методів, які можна застосовувати для вимірювання поверхневої густини η тканин.

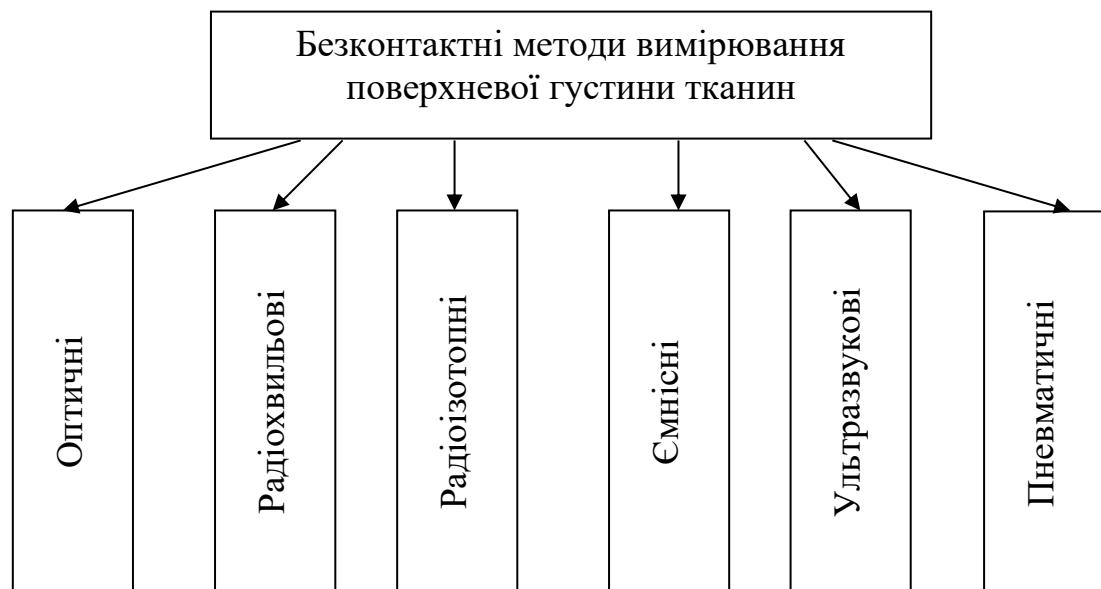


Рисунок 1.1 - Класифікація безконтактних методів вимірювання поверхневої густини η тканин

Для безконтактного контролю поверхневої густини η тканин можуть використовуватися оптичні, радіохвильові, радіоізотопні, ємнісні, пневматичні, ультразвукові методи та засоби.

1.2.1. Оптичні методи та засоби вимірювання

На сьогоднішній день існує багато оптичних методів та засобів контролю [16-17], серед яких поширеними є інтерференційні, дифракційні, мікроскопічні.

Переваги та недоліки зазначених методів, які можуть застосовуватися для безконтактного контролю поверхневої густини η у процесі виробництва, наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Переваги та недоліки оптичних методів вимірювання

Оптичні методи вимірювання		
Метод	Переваги	Недоліки
Інтерференційний	Можливість точного визначення контрольованого параметру за інтерференційною картиною; можливість використання стандартних схем для контролю багатьох параметрів; нечутливість до багатьох дестабілізуючих факторів.	Складність реалізації; висока вартість обладнання; необхідність в кваліфікованому обслуговуванні персоналом, який зможе правильно налаштовувати обладнання для контролю різних матеріалів; складність ремонту засобів контролю.
Дифракційний	Підвищення чутливості при зменшенні вимірюваної величини; незалежність вимірювань від потужності джерела випромінювання.	Складність реалізації оптичної системи; висока вартість обладнання; необхідність контролю невеликих величин параметру для забезпечення високої чутливості.
Мікроскопічний	Точність визначення контрольованого параметру; широкий спектр використання; можливість визначення структурних особливостей об'єкта контролю.	Складність реалізації системи оптичних лінз; висока вартість; необхідність в незапиленому середовищі; необхідність правильного налаштування та обслуговування.

Оскільки до розповсюджених оптичних методів та засобів, за допомогою яких можна визначати поверхневу густину η , відносять інтерференційні, то доцільно їх розглянути детальніше.

Інтерференційні методи, базуються на аналізі інтерференційної картини, яка виникає при відбитті світла від поверхні контрольованого матеріалу або від поверхні дзеркала, що прикріплюється до готового виробу.

Інтерферометр, за допомогою якого можна визначати поверхневу густину η контрольованої тканини представлений на рис. 1.2.

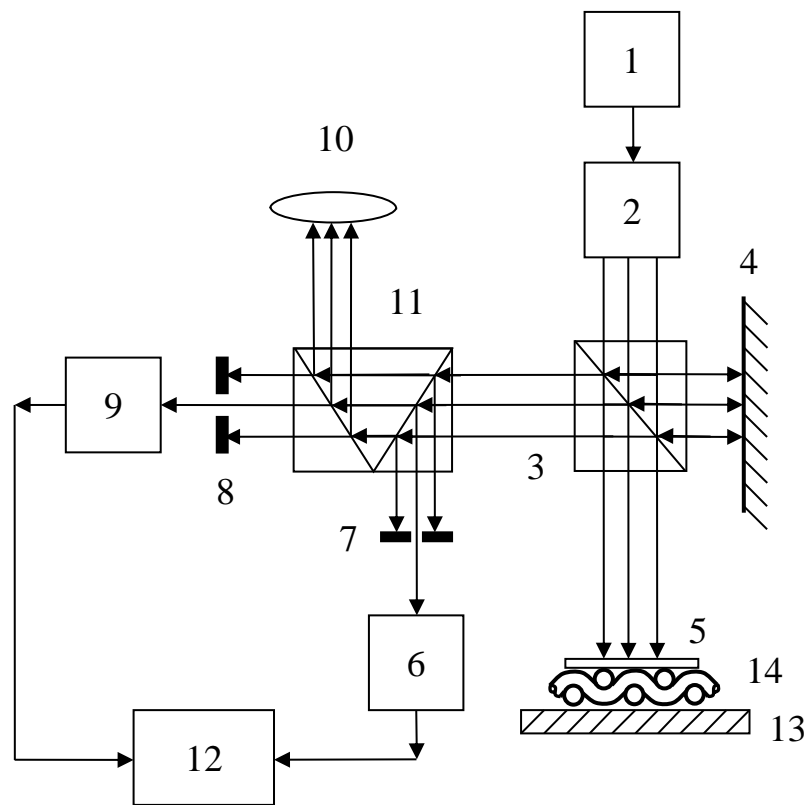


Рисунок 1.2 - Структурна схема одночастотного лазерного інтерферометра для вимірювання поверхневої густини η тканин

Інтерферометр працює наступним чином [17]. Випромінювання одночастотного лазера 1 за допомогою коліматора 2 та світлоподільного куба 3 поділяється на два пучка. Один пучок випромінювання направляється на дзеркало 5, яке прикріплюється до контрольованої тканини 14, яка лежить на опорній площині 13, а інший – на нерухоме дзеркало 4. Пучки випромінювання, які відбиваються від дзеркал 4 та 5, інтерферують на межі площини куба 11. Інтерференційну картину, яка виникла, можна спостерігати використовуючи окуляр 10. Інтерференційна картина через щілинні діафрагми 7, 8 потрапляє на фотоприймачі 6, 9. Ці фотоприймачі на виході інтенсивність освітлення, яке відображається у вигляді інтерференційних смуг, перетворюють у електричний сигнал. Цей сигнал фіксується відліковим пристроєм 12.

Перед початком вимірювань, коли відсутня тканина у вимірювальному каналі, отримують інтерференційну картину при якій поверхнева густина $\eta = 0$.

Цикл вимірювання фотоприймачів 6, 9 забезпечується при зміні оптичної довжини плеча на $\lambda/2$, де λ – довжина оптичної хвилі, коли відбувається двохкратне проходження променем оптичного шляху між ділильною пластиною та дзеркалами 4 та 5. Фаза оптичного випромінювання пропорційна величині товщини тканини, тоді поверхневу густина η , знаючи об'ємну густина тканини, можна визначити з виразу:

$$\eta = \rho h = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\varphi_v}{2\pi} \cdot \rho = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \rho (\varphi_{vk} - \varphi_{v0}), \quad (1.4)$$

де ρ – об'ємна густина контрольованої тканини 14;

h – товщина контрольованої тканини 14;

φ_v – фаза оптичного випромінювання;

$\varphi_{v0}, \varphi_{vk}$ – початкове та кінцеве значення фази оптичного випромінювання.

Аналіз відомих оптичних методів та засобів, які можуть застосовуватися для контролю поверхневої густини η , показав, що похибки вимірювання можуть виникати при неоднорідній пористості контрольованої тканини, при зміні її натягу та внаслідок зміни фази будови, що важливо враховувати при контролі. Вимоги з експлуатації оптичних засобів досить жорсткі, вони потребують кваліфікованого обслуговування, навколишнє середовище в процесі вимірювання повинне бути малозапиленим, а контрольовані об'єкти, у багатьох випадках, повинні бути прозорими в оптичному діапазоні випромінювання. Зазначене вище, висока вартість та складність побудови вимірювальних засобів не дозволяють використовувати оптичні методи для контролю тканин у виробничих умовах безпосередньо в процесі виробництва.

1.2.2. Радіохвильові методи та засоби вимірювання

У залежності від параметрів, що вимірюються, радіохвильові методи можна поділити на: амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, геометричний, частотно-фазовий, поляризаційний та імпульсний методи [18]. В табл. 1.2 розглянуто переваги та недоліки зазначених методів контролю.

Таблиця 1.2 - Переваги та недоліки радіохвильових методів контролю

Радіохвильові методи вимірювання		
Метод	Переваги	Недоліки
Амплітудний	Можливість точного визначення необхідного параметру за допомогою амплітуди електромагнітних хвиль; проста реалізація; можливість застосування у багатьох галузях виробництва.	Необхідність у проведенні контролю матеріалів з одно-рідною структурою та з постійними розсіювальними властивостями поверхні; об'єкти контролю повинні мати високу поглинальну здатність.
Фазовий	Можливість точного визначення контрольованого параметру за зміною фази; для контрольованих параметрів виробу залежність фази може бути лінійною.	Необхідність у правильному налаштуванні засобів при контролі різних матеріалів; чутливість фази до багатьох дестабілізуючих чинників структури матеріалу.
Амплітудно-фазовий	Можливість точного визначення параметру контролю за допомогою двох параметрів електромагнітних хвиль, а саме амплітуди та фази, що розширює можливості такого контролю;	Необхідність в раціональних рішеннях побудови вимірювальної схеми; складність обробки вимірювальної інформації; необхідність у проведенні контролю матеріалів з однорідною структурою;
Геометричний	Можливість визначення контрольованого параметру товстих виробів; можливість визначення контрольованого параметру не знаючи показника заломлення електромагнітної хвилі у матеріалі.	Необхідність у мінімальному поперечному перерізі випромінюючого пучка і у мінімальній його розбіжності; необхідність у правильному налаштуванні засобів при контролі різних матеріалів.
Поляризаційний	Можливість точного визначення за допомогою площини поляризації, яка в залежності від параметру контролю може змінюватися; можливість застосування схем як “на проходження”, так і “на відбиття” електромагнітних хвиль.	Необхідність в правильному налаштуванні; складність у реалізації для контролю параметрів багатьох об'єктів, які мають складні структурні будови, а також для матеріалів, що мають волокнистий склад; забезпечення необхідних параметрів антен.
Частотно-фазовий	Можливість визначення контрольованого параметру за допомогою зміни частоти без необхідності у визначенні діелектричної проникності матеріалу.	Необхідність у періодичному ереналаштовуванні частоти; ускладненість обробки вимірювань параметрів від-битого сигналу; необхідність в опорному сигналові.
Імпульсний	Можливість точного визначення контрольованого параметру для багатьох матеріалів за часом розповсюдження електромагнітної хвилі в їхньому середовищі; широке розповсюдження стандартних схем для багатьох галузей виробництва.	Необхідність у стабілізації параметрів сигналу, який випромінюється; складність реалізації для об'єктів контролю, що мають складну внутрішню структуру з межами різних середовищ, від яких може відбуватися перевідбиття; необхідність правильного налаштування.

Оскільки для контролю поверхневої густини η пакетів текстильних матеріалів можна використовувати геометричний метод, то розглянемо його детальніше.

Геометричний метод контролю [18] базується на зондуванні контрольованого виробу електромагнітною хвилею, при цьому вона падає під кутом θ до нормалі поверхні, після чого визначається відстань l між точками входу та виходу променя. На рис.1.3 представлена спрощена структурна схема пристрою, який реалізує геометричний метод контролю поверхневої густини η текстильних пакетів з тканин різного сировинного складу.

Пристрій працює наступним чином. Генератор електромагнітних хвиль високої частоти 1 подає коливання на випромінюючий рупор 2, який

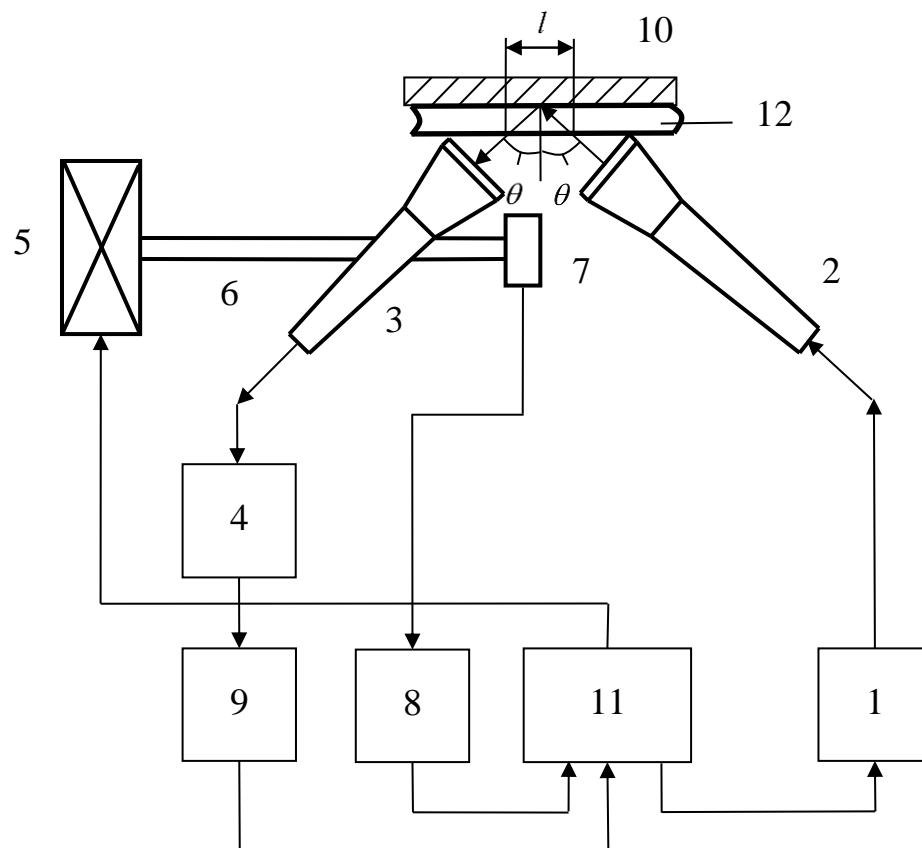


Рисунок 1.3 - Спрощена структурна схема радіохвильового пристрою для вимірювання поверхневої густини η пакету текстильних матеріалів

випромінює їх під кутом θ_1 до нормалі поверхні контрольованого пакету текстильних матеріалів 12, при середній поверхневій густини η контрольованого пакету 12, електромагнітна хвиля відбивається від металевого відбивача 10, який прикладається до пакету текстильних матеріалів 12, та потрапляє у приймаючий рупор 3, потім фіксується детектором 4, після чого підсилюється підсилювачем 9 та потрапляє до блоку управління, обчислення та індикації 11, двигун 5 переміщує приймаючий рупор 3 на найбільшу інтенсивність електромагнітного пучка по каретці з гвинтом 6, двигун 5 керується блоком управління, обчислення та індикації 11, а перетворювач 7 перетворює оберти гвинта в лінійний електричний сигнал, потім підсилювач 8 підсилює електричний сигнал, а за допомогою блоку управління, обчислення та індикації 11, навіть не знаючи показник заломлення середовищ, зробивши ще одне вимірювання під іншим кутом падіння θ_2 електромагнітної хвилі, визначається та показується поверхнева густина η , яку можна подати як:

$$\eta = \rho_{к.л.} h_{к.л.} = \rho_{к.л.} l_1 l_2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{l_1^2 \sin^2 2\theta_2 - l_2^2 \sin^2 \theta_1}}, \quad (1.5)$$

де $\rho_{к.л.}$ – об’ємна густина контрольованого пакету текстильних матеріалів 12;

$h_{к.л.}$ – товщина контрольованого пакету текстильних матеріалів 12;

l_1, l_2 – відстані між точками входу і виходу променів електромагнітних хвиль першого та другого вимірювань.

Проведений аналіз відомих радіохвильових методів та засобів, які можуть застосовуватися для контролю поверхневої густини η , показав, що похибки вимірювань можуть виникати при неоднорідній об’ємній густини ρ контрольованих тканин, при зміні їх натягу та внаслідок зміни фази будови самих тканин. Радіохвильові засоби можуть мати велику похибку

вимірювання поверхневої густини η і переважно дозволяють контролювати товсті тканини та пакети текстильних. Зазначене не дає можливості використовувати радіохвильові методи та засоби для контролю багатьох тканин з невеликою поверхневою щільністю η .

1.2.3. Радіоізотопні методи та засоби вимірювання

Одними з основних безконтактних методів та засобів, які можуть бути використані для оперативного технологічного контролю поверхневої густини η тканин, є радіоізотопні [19-21].

Радіоізотопні засоби контролю можна поділити на альбедні, абсорбційні, альбедно-абсорбційні та емісійні. В альбедних засобах контролю інформативним параметром є зворотнє розсіювання випромінювання. В абсорбційних засобах використовується параметр зміни інтенсивності іонізуючого випромінювання, яке пройшло крізь контрольований виріб чи матеріал. В емісійних засобах збуджується вторинне випромінювання в контрольованому виробі чи матеріалі, яке застосовується для визначення потрібного параметру.

В табл. 1.3 розглянуто переваги та недоліки зазначених методів вимірювання.

Таблиця 1.3 - Переваги та недоліки радіоізотопних методів вимірювання

Радіоізотопні методи вимірювання		
Метод	Переваги	Недоліки
Альбедний	Точне визначення контрольованого параметру за зворотним розсіюванням випромінювання.	Можуть виникати похибки вимірювання у зв'язку з кутовими переміщеннями контрольованого виробу.
Абсорбційний	Точне визначення контрольованого параметру за зміною інтенсивності іонізуючого випромінювання, після проходження його крізь контрольований виріб, на що не впливає структура самого виробу; простота принципу вимірювання.	Можуть виникати похибки внаслідок зниження активності джерела радіоактивного випромінювання; висока вартість експлуатації; необхідність проведення заходів щодо утилізації; потрібно забезпечувати захист робочого персоналу, який проводить вимірювання.
Альбедно-абсорбційний	Можливість точного визначення контрольованого параметру комбінованим методом, що розширює можливості контролю.	Висока вартість експлуатації; необхідність проведення заходів щодо утилізації; можуть виникати похибки внаслідок переміщення виробу.
Емісійний	Можливість точного визначення контрольованого параметру виробу за допомогою вторинного випромінювання в ньому.	Висока вартість експлуатації та утилізації; небезпечність для людини; складність застосування методу для контролю багатьох виробів.

Оскільки для контролю поверхневої густини η тканин можна застосовувати поширені абсорбційні β - густиноміри, то розглянемо їх детальніше на прикладі одного з них.

Ступінь ослаблення γ густини потоку енергії іонізуючого випромінювання пропорційна масі речовини на ділянці одиничної площі з іонізуючим випромінюванням або поверхневій густини η тканини, яку можна виразити як:

$$\eta = \gamma = \frac{\Delta m}{\Delta S}, \quad (1.6)$$

де Δm – маса контрольованої тканини на ділянці контролю;

ΔS – площа ділянки контролю.

Пристрій контролю поверхневої густини η тканин [22], який реалізує наведений вище метод, представлений на рис.1.4.

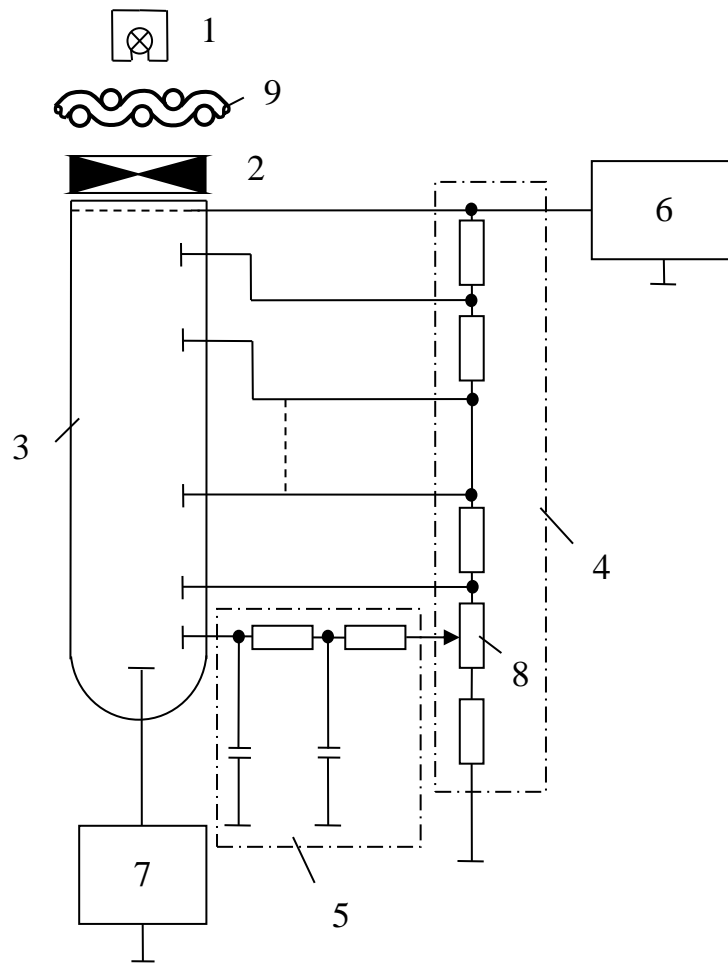


Рисунок 1.4 - Структурна схема радіоізотопного пристрою контролю поверхневої густини η тканин

Пристрій містить джерело 1 β - випромінювання, детектор 2, фотоелектронний помножувач (ФЕП) 3 з подільником напруги 4, інтегруючу ланку 5, джерело живлення високої напруги 6, блок реєстрації 7, змінний резистор 8, контрольована тканина 9.

Пристрій працює наступним чином. Джерело 1 β - випромінювання та детектор 2 переміщуються механізмом сканування за всією шириною контрольованої тканини 9. Напрямок руху механізму перпендикулярний напрямку руху тканини 9. Джерело 1 та детектор 2 періодично проводять

еталонування на повітрі за межею тканини 9. Випромінювання, яке не поглинається, реєструється детектором 2. Інтенсивність цього випромінювання залежить від поверхневої густини η контрольованої тканини 9.

Якщо величина поверхневої густини η тканини 9 різко змінюється, або коли відбувається еталонування на повітрі, то виникає стрибкоподібне збільшення струму ФЕП 3. Напруга на останньому диоді ФЕП 3 зменшується у відповідності з параметрами інтегруючої ланки 5, а не стрибком. Коефіцієнт підсилення ФЕП 3 збільшується, що компенсує його зменшення, яке виникає через “ вибіг ” струму ФЕП 3.

При застосуванні радіоізотопних методів та засобів виникають похибки вимірювання. Зазначені похибки пов’язані з горизонтальними та кутовими переміщеннями контрольованих тканин у процесі виробництва. З часом постає необхідність у коригуванні показників внаслідок зниження активності джерела радіоактивного випромінювання. Громіздкість та велика вага перетворювачів ускладнює задачу їх прикріплення до опор, необхідність забезпечення еталонування в багатьох радіоізотопних засобах контролю, висока вартість експлуатації та утилізації, а також необхідність у забезпеченні захисту персоналу від радіоактивного опромінення, призводять до обмеженого застосування таких методів та засобів контролю.

1.2.4. Ємнісні методи та засоби вимірювання

Ємнісні методи та засоби контролю [23] поверхневої густини η базуються на залежності ємності плоского конденсатора від товщини h контрольованої тканини з відомою об’ємною щільністю ρ . При цьому тканина розміщується між пластинами конденсатора. Ємність плоского конденсатора можна показати у вигляді:

$$C = 0,089 \cdot \frac{S_{пл.} \cdot \epsilon_0}{d}, \quad (1.7)$$

де C — ємність плоского конденсатора;

$S_{пл.}$ – площа пластин конденсатора;

ε_0 – діелектрична проникність повітряного середовища;

d – відстань між пластинами.

Ємність датчика при безконтактному контролі поверхневої густини η може бути показана як ємність конденсатора з діелектриком, який поділяється на два прошарки. Один шар цього діелектрика може бути представлений сумою повітряних зазорів, що утворюються між контрольованою тканиною та пластинами конденсатора. Другий шар діелектрика представляє собою контрольовану тканину. Ємність такого датчика можна визначити з виразу [23]:

$$C = 0,089 \cdot \frac{S_{пл.}}{\frac{d-h}{\varepsilon_0} + \frac{h}{\varepsilon}}, \quad (1.8)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу контрольованої тканини.

Знаючи, що $\eta = \rho h$ з виразу (1.8) можна визначити поверхневу густину η контрольованої тканини при відомій її об'ємній густини ρ :

$$\eta = \frac{\rho \left(\frac{0,089 S_{пл.}}{C} - \frac{d}{\varepsilon_0} \right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_0} \right)}. \quad (1.9)$$

На рис.1.5 представлений найпростіший ємнісний датчик, який можна використовувати для вимірювання поверхневої густини η тканин.

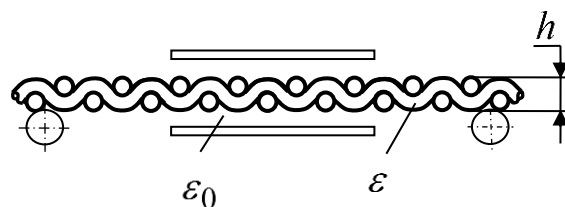


Рисунок 1.5 - Ємнісний датчик, який можна використовувати для вимірювання поверхневої густини η тканин

До переваг ємнісних методів та засобів можна віднести можливість безконтактного контролю, а до недоліків слід віднести вплив на покази пристроїв діелектричної проникності ε_0 навколишнього середовища та діелектричної проникності ε тканини. Діелектричні проникності ε_0 та ε , в свою чергу, залежать від вологості та температури навколишнього середовища. Також до недоліків ємнісних методів і засобів вимірювання необхідно віднести невисоку чутливість до невеликої зміни вимірюваної величини, що не дає можливості контролювати тканину з малою поверхневою щільністю η . Покази ємнісних засобів контролю будуть пов'язані однозначно з поверхневою щільністю η тільки при відомій об'ємній густини ρ контрольованої тканини. При цьому величина об'ємної густини ρ не повинна змінюватися в процесі виробництва. Тому ємнісні методи і засоби складно застосовувати для оперативного вимірювання поверхневої густини η тканин безпосередньо під час технологічного процесу.

1.2.5. Пневматичні методи та засоби вимірювання

Пневматичні безконтактні методи та засоби, які можуть застосовуватися для контролю поверхневої густини η тканин, поділяються на два типи [24, 25], а саме на ротаметричні і манометричні.

Ротаметричний метод контролю базується на залежності швидкості повітряного потоку від зазору. В основу манометричного методу покладено залежність тиску повітря від зазору. Основні переваги та недоліки наведених пневматичних методів наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Переваги та недоліки пневматичних методів вимірювання

Пневматичні методи вимірювання		
Метод	Переваги	Недоліки
Ротаметричний	Точне визначення контрольованого параметру за зміною швидкості повітряного потоку від зміни зазору, що утворюється між виробом та соплом; не потребує багато витрат.	Вузький діапазон вимірюваної величини контрольованого параметру; необхідність забезпечення руху виробу на спеціальній базовій поверхні із певною швидкістю.
Манометричний	Точне визначення контрольованого параметру за зміною тиску від зазору, що утворюється між виробом та соплом; простота принципу вимірювання.	Необхідність в очищенні стисненого повітря від різних домішків та масла; вузький діапазон вимірюваної величини контрольованого параметру; необхідна певна швидкість руху виробу.

Оскільки манометричний метод простіший в реалізації, то розглянемо його більш детально. Пневматичний датчик [25], за допомогою якого можна визначати поверхневу густину η тканин, представлений на рис.1.6.

Для визначення контрольованого параметру необхідно забезпечити рух тканини на базовій поверхні з певною сталою швидкістю.

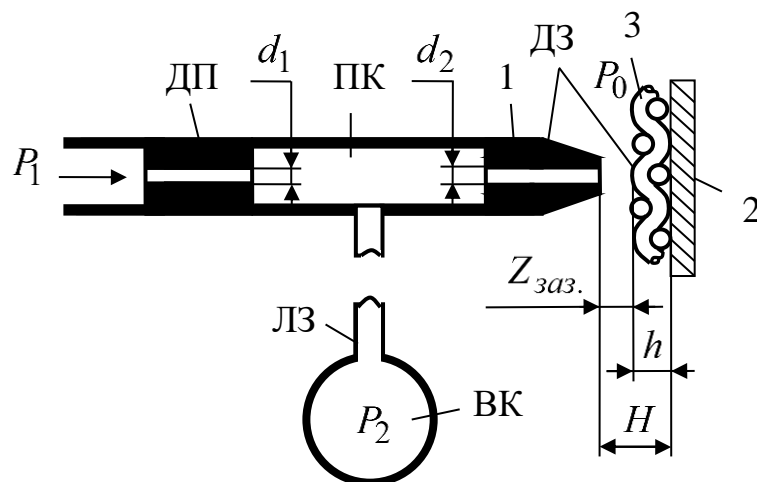


Рисунок 1.6 - Пневматичний датчик для вимірювання поверхневої густини η тканин

Працює пневматичний датчик наступним чином. Очищене стиснене повітря з постійним тиском p_1 , яке подається крізь дросель постійного опору (ДП), потім потрапляє в проточну камеру (ПК). З цієї камери повітря крізь сопло 1, яке знаходиться біля контрольованої тканини 3, що лежить на базовій поверхні 2, витікає у зовнішнє середовище. Сопло 1 з тканиною 3 та з базовою поверхнею 2 разом формують дросель змінного опору (ДЗ). Камера ПК з'єднана лінією зв'язку (ЛЗ) з вимірювальною камерою (ВК).

Якщо змінюється товщина h контрольованої тканини 3, то відстань до сопла 1 теж змінюється. Через дросель ДЗ виходить повітря з камери ПК в навколишнє середовище (з тиском p_0). Відстань між соплом 1 та тканиною змінюється і тиск p_2 теж змінюється в камері ПК, який по лінії зв'язку ЛЗ передається камері ВК.

Тиск p_2 є вихідним сигналом пневматичного датчика. Вхідним сигналом є зміна товщини h контрольованої тканини 3 відносно сопла 1. Поверхневу густину η тканини 3 при відомій її об'ємній густини ρ можна визначити з наступного виразу:

$$\eta = \rho h = \rho (H - Z_{\text{заз.}}), \quad (1.10)$$

де H – відстань між соплом 1 і базовою поверхнею 2;

$Z_{\text{заз.}}$ – зазор між торцем сопла 1 і поверхнею контрольованої тканини

3. Вираз для тиску p_2 стисненого повітря можна записати так:

$$p_2 = \frac{\zeta_2 p_1}{\zeta_2 + \zeta_1 \left(\frac{4 \pi d_2 Z_{\text{заз.}}}{\pi d_1^2} \right)^2}, \quad (1.11)$$

де ζ_1, ζ_2 – коефіцієнти опорів нерегульованого та регульованого дроселів ДП та ДЗ;

d_1, d_2 – внутрішні діаметри отворів дроселя ДП та сопла 1.

З виразу (1.11) визначається величина зазору $Z_{\text{заз.}}$, а підставивши отримане рівняння у залежність (1.10), можна поверхневу густину η тканини

З подати так:

$$\eta = \rho \left(H - \frac{d_1^2}{4d_2} \cdot \sqrt{\frac{\zeta_2(p_1 - p_2)}{\zeta_1 p_2}} \right). \quad (1.12)$$

Таким чином, значення поверхневої густини η контрольованої тканини 3 визначається із зміною тиску повітря, при цьому об'ємна густина ρ не повинна змінюватися у ході виробничого процесу, що не завжди можливо забезпечити технологічно.

До недоліків пневматичних методів і засобів контролю поверхневої густини η тканин потрібно віднести вузький діапазон вимірюваної величини, необхідність проведення очищеного повітря. Також можуть виникати похибки через неоднорідну об'ємну густина ρ тканини. У зв'язку з цим пневматичні методи і засоби важко застосовувати у виробничих умовах для контролю поверхневої густини η тканин.

1.2.6. Ультразвукові методи та засоби вимірювання

Ультразвукові методи та засоби контролю [26-33] розповсюджені у наш час у різних сферах промисловості та використовуються на виробництві. Безконтактні ультразвукові методи та засоби контролю порівняно з іншими аналогами [34-36] мають ряд переваг, до яких можна віднести простоту випромінювання та прийому ультразвукових коливань, можливість визначення вимірюваної величини з досить високою точністю, можливість налаштування частоти коливань для забезпечення потрібних параметрів контролю, а також відсутність шкідливого впливу на людину від випромінювання.

Безконтактні ультразвукові методи та засоби вимірювання можна поділити на дві основні групи, одна з яких із безперервним випромінюванням ультразвукових хвиль, а інша з імпульсним. В ультразвукових засобах контролю, які базуються на безперервному випромінюванні, можуть виникати

похибки вимірювань через накладання хвиль безперервного сигналу, через складність обробки вимірювальної інформації [37-41], а також може відбуватися явище стоячої хвилі, яке небажане при вимірюванні. Усе перераховане ускладнює контроль необхідного параметру в процесі виробництва. Ультразвукові засоби контролю, які базуються на імпульсному випромінюванні, мають більше переваг у порівнянні з попередніми. За допомогою ультразвукових засобів контролю з імпульсним випромінюванням необхідний параметр можна визначати за зміною амплітуди, фази або за часовими характеристиками ультразвукових коливань. Наведені методи та засоби можна вважати перспективними при подальшій роботі з їх вдосконалення.

На рис. 1.7 представлена класифікація ультразвукових безконтактних методів, які можуть використовуватися для контролю поверхневої густини η тканин.

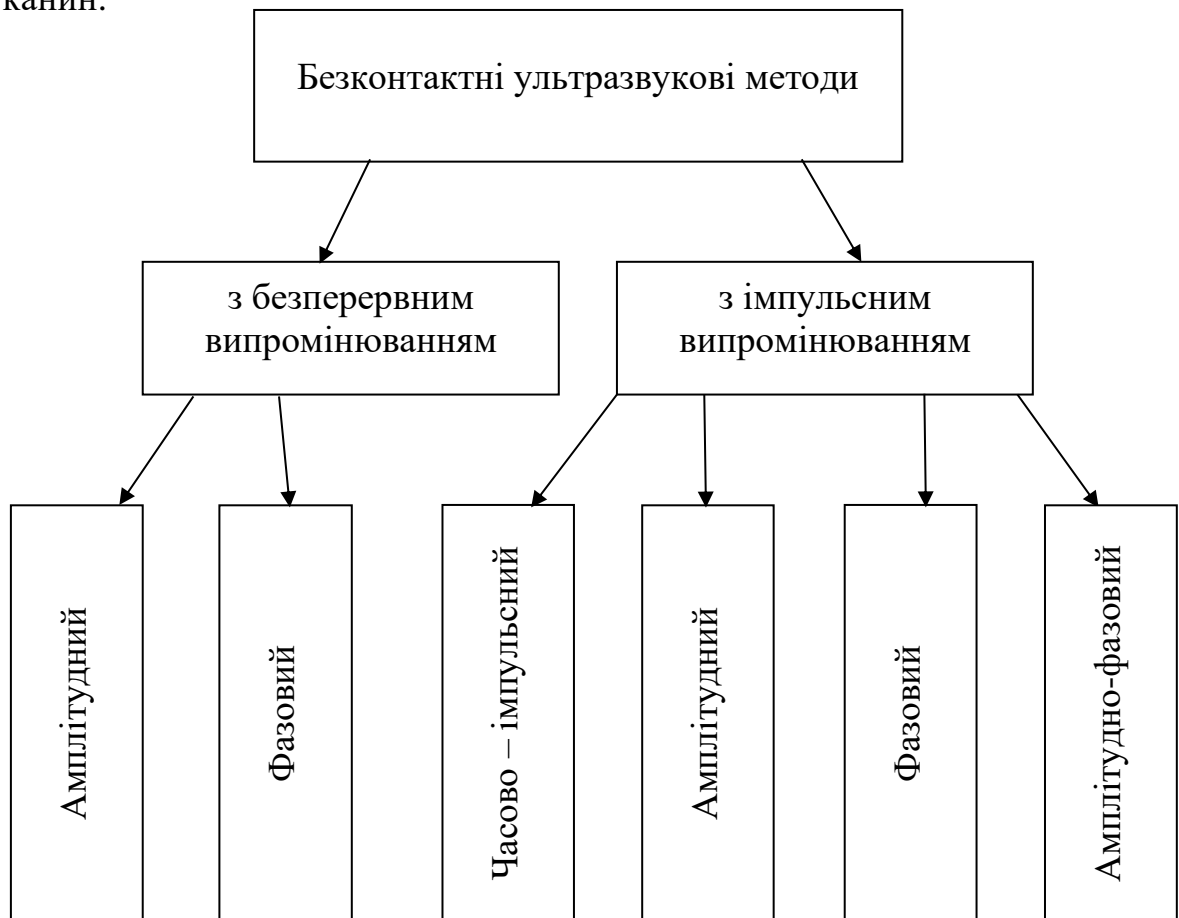


Рисунок 1.7 - Класифікація ультразвукових безконтактних методів вимірювання поверхневої густини η тканин

Для технологічного контролю поверхневої густини η тканин, як показав проведений вище аналіз, доцільно використовувати ультразвукові безконтактні методи. Оскільки імпульсні засоби мають найменше недоліків, що пов'язані з перевідбиттям хвиль та їхнім накладанням, що ускладнює обробку вимірювальної інформації, то доцільно застосовувати саме їх для контролю. Проведемо також порівняння переваг та недоліків безконтактних імпульсних ультразвукових методів та наведемо їх в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 - Переваги та недоліки ультразвукових методів контролю

Ультразвукові методи контролю		
Метод	Переваги	Недоліки
Амплітудний	Можливість точного визначення контрольованого параметру за амплітудою ультразвукової хвилі; простота реалізації; надійність; простота у налаштуванні та у використанні; невисока вартість.	Можуть виникати похибки, які пов'язані із згасанням амплітуди ультразвукових хвиль в матеріалі контрольованого виробу; необхідність у визначенні оптимальних параметрів хвиль для контролю параметру виробу.
Фазовий	Для контрольованих параметрів залежність фази може бути лінійною; можливість точного визначення параметру виробу.	Чутливість фази ультразвукових хвиль до зміни температури; вплив вологості середовища на визначення необхідного параметру.
Амплітудно-фазовий	Можливість точного визначення параметру контролю за допомогою амплітуди та фази ультразвукових хвиль.	Підвищена складність побудови вимірювальної схеми; складність обробки вимірювальної інформації; вплив дестабілізуючих факторів.
Часово - імпульсний	Можливість точного визначення контрольованого параметру для багатьох матеріалів за часом розповсюдження хвиль.	Необхідність у стабілізації параметрів сигналу, який випромінюється; необхідність у правильному налаштуванні при вимірюванні.

На сьогоднішній день розповсюджені імпульсні засоби контролю [42-46], які побудовані на принципі знаходження подвійного часу проходження ультразвуковим імпульсом контрольованого виробу або відстані до нього. Знаючи швидкість c розповсюдження ультразвукової хвилі можна визначати необхідний технологічний параметр.

На рис. 1.8 показано суміщений п'єзоперетворювач з випромінюючою частиною 1 та приймаючою частиною 2 при часово-імпульсному методі вимірювання [47] поверхневої густини η тканин.

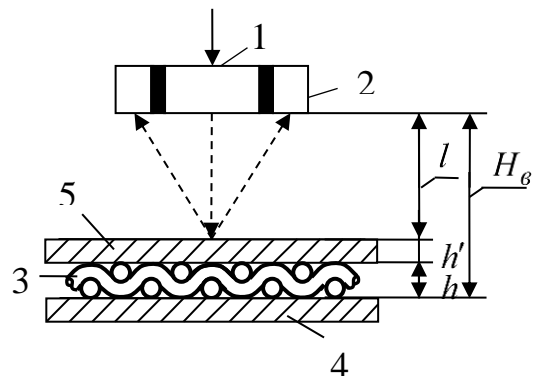


Рисунок 1.8 - Розміщення суміщеного п'єзоперетворювача з випромінюючою та приймаючою частинами при безконтактному методі контролю поверхневої густини η тканин

Безконтактний часово-імпульсний метод може застосовуватися для контролю поверхневої густини η тканин, з базовою поверхнею 4 та відбивачем 5 (рис.1.8).

За допомогою зондування рівня поверхні металевого відбивача 5, що прикріплюється до контрольованої тканини 3, яку помістили на базову поверхню 4, вимірюють часовий інтервал t , який дорівнює:

$$t = \frac{2l}{c_0} = \frac{2}{c_0} (H_{с.} - h - h'), \quad (1.13)$$

де l – відстань між ультразвуковим випромінювачем 1 і поверхнею металевих відбивача 5;

$H_{с.}$ – відстань між ультразвуковим приймачем 2 і базовою поверхнею 4;

h – товщина контрольованої тканини 3;

h' – товщина металевого відбивача 5;

c_0 – швидкість розповсюдження ультразвуку у повітряному середовищі.

З виразу (1.13) можна визначити поверхневу густину η контрольованої тканини 3, знаючи її об'ємну щільність ρ :

$$\eta = \rho h = \rho(H - h' - l) = \rho \left(H - h' - \frac{t \cdot c_0}{2} \right). \quad (1.14)$$

Перевагою ультразвукового методу є простота, а його недоліком є те, що необхідно забезпечити щільне прилягання контрольованої тканини 3 до металевого відбивача 5 та до базової поверхні 4. Також для практичного застосування методу необхідно знати об'ємну густину ρ , яка не повинна змінюватися в процесі виробництва.

Якщо порівнювати розглянутий часово-імпульсний метод з амплітудним методом, то останній має більше переваг. Амплітудний метод є достатньо точним при однакових порах в тканинах та простим у реалізації.

На рис. 1.9 показано розташування п'єзоперетворювачів при амплітудному методі контролю поверхневої густини η тканин.

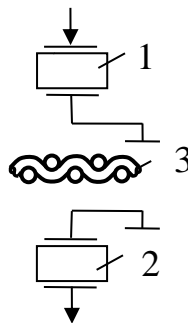


Рисунок 1.9 - Розташування п'єзоперетворювачів при безконтактному амплітудному методі контролю поверхневої густини η тканин

Ультразвуковий амплітудний метод контролю [50] базується на вимірюванні амплітуди хвиль, що випромінюються та взаємодіють з контрольованою тканиною 3. Поверхневу густину η контрольованої тканини 3

можна визначити за ослабленням амплітуди ультразвукової хвилі, тобто за амплітудою хвилі, що пройшла крізь тканину 3, і яку можна виразити так:

$$A_1 = A_0 \cdot e^{-\varepsilon_i \eta}, \quad (1.15)$$

де ε_i – параметр ослаблення;

A_0 і A_1 – амплітуди падаючої хвилі та хвилі, що пройшла крізь контрольовану тканину 3.

З виразу (1.15) можна знайти поверхневу густину η контрольованої тканини 3, яку можна подати як:

$$\eta = \frac{\ln A_0 - \ln A_1}{\varepsilon_i}. \quad (1.16)$$

Із залежності (1.16) видно, що на відміну від інших наведених методів, окрім радіоізотопного, на визначення поверхневої густини η тканини амплітудним методом не впливає її об'ємна густина ρ . При цьому перевагою амплітудного методу контролю є безпечність для людини на відміну від радіоізотопного. Тому амплітудні методи та засоби найбільш доцільно застосовувати для подальших досліджень у галузі безконтактного неруйнівного контролю тканин.

Проведений аналіз показав, що розглянутий ультразвуковий амплітудний метод контролю, який полягає у вимірюванні амплітуди сигналу, що пройшов крізь тканину, досить простий у реалізації. До його переваг, крім простоти, можна віднести безпосереднє визначення поверхневої густини η тканини та відсутність шкідливого впливу на людину від випромінювання. Тому нові ультразвукові пристрої дадуть змогу проводити безперервний оперативний технологічний контроль різних параметрів тканин безпосередньо в процесі виробництва, підвищуючи тим самим загальну якість та конкурентоздатність готових виробів з тканин різного призначення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Проведений аналіз показав, що забезпечення необхідної поверхневої густини потрібного значення потребує постійного її контролю в процесі виробництва.

2. На сьогоднішній день використовують руйнівні контактні методи контролю поверхневої густини тканин, які базуються на вирізанні та зважуванні зразків тканин, тоді як безконтактні не використовуються хоча мають ряд переваг у порівнянні з контактними.

3. Як показав проведений аналіз, з усіх методів найбільше для оперативного технологічного контролю за своїми характеристиками і можливостями підходять радіоізотопний та ультразвуковий. Проведений порівняльний аналіз показав, що найбільш доцільно використовувати ультразвукові методи.

4. Таким чином, основними задачами магістерської дипломної роботи є:

- розробити математичну модель проходження безперервного ультразвукового сигналу крізь контрольовану тканину та модель відбиття сигналу від неї, а також провести їхній аналіз;
- розробити математичну модель та провести аналіз для імпульсного ультразвукового сигналу, що пройшов крізь контрольовану тканину, пов'язавши його з поверхневою густиною;
- розробити безконтактні ультразвукові методи контролю поверхневої густини η як для пакетів текстильних матеріалів, так і для різних тканин, з можливістю контролю інших їхніх параметрів;
- розробити експериментальну установку та безконтактний ультразвуковий пристрій контролю поверхневої густини тканин, а також визначити його основні метрологічні характеристики.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН

Для застосування ультразвукового безконтактного методу контролю поверхневої густини потрібно вирішити ряд задач. З цією метою в даному розділі розглянуті особливості розповсюдження ультразвуку в тканинах і отримані аналітичні залежності, які пов'язують амплітудні співвідношення ультразвукових сигналів з поверхневою густиною контрольованої тканини, та проведений їх аналіз.

2.1. Дослідження розповсюдження ультразвуку в тканинах

Однією з особливостей тканин є наявність пор між нитками, які заповнені повітрям. Більша частина ультразвукового сигналу найчастіше проходить тільки крізь пори оминаючи самі нитки. Тому амплітуда цього сигналу буде змінюватися в залежності від розміру пор та від довжини ультразвукової хвилі.

Для повного уявлення про проходження ультразвукової хвилі крізь нитки основи, утку тканини та пори між ними, необхідно враховувати складну структуру тканини та її показники [42-46].

При збільшенні довжини ультразвукової хвилі амплітуда сигналу, що проходить крізь тканину, збільшується, а при зменшенні довжини хвилі амплітуда сигналу навпаки зменшується. Для деяких тканин можна підібрати таку довжину ультразвукової хвилі, щоб можна було розглядати проходження та відбиття хвиль від тканини як процес, який проходить з матеріалом плоского шару, що має однорідну структуру. Але не завжди виходить налаштувати необхідну частоту ультразвукових коливань для різних тканин, оскільки розміри діаметрів їх ниток та пор можуть відрізнятися між собою, а їхнє співвідношення з довжиною хвилі не є явно вираженим. Зазначене вище відноситься до діапазону частоти ультразвукових хвиль, якими

опромінюються тканини при безконтактному контролі (20 -100 кГц), тому і довжину хвилі теж можна змінювати в цьому діапазоні.

На рис. 2.1 показане розсіювання, накладання хвиль та ділянки площі тканини де це може відбуватися.

На рис. 2.2 схематично зображено проходження та відбиття ультразвукових хвиль від зразків тканин полотняного переплетіння зі структурою рихлісного шару, яка відповідає переважній більшості тканин, та зі структурою, що наближається до плоского шару.

На обох рисунках тиски у хвилях, що падають на тканину, позначені P_{01} , $P_{02} \dots P_{0n}$, тиски у хвилях, які відбиваються від меж ниток та розсіюються, – $P_{e.1}$, $P_{e.2} \dots P_{e.6}$, тиски у хвилях, що відбиваються від меж ниток та проходять крізь пори тканини, – $P_{e.np.1}$, $P_{e.np.2} \dots P_{e.np.n}$, тиски у хвилях, які проходять крізь тканину, – $P_{np.1}$, $P_{np.2} \dots P_{np.n}$.

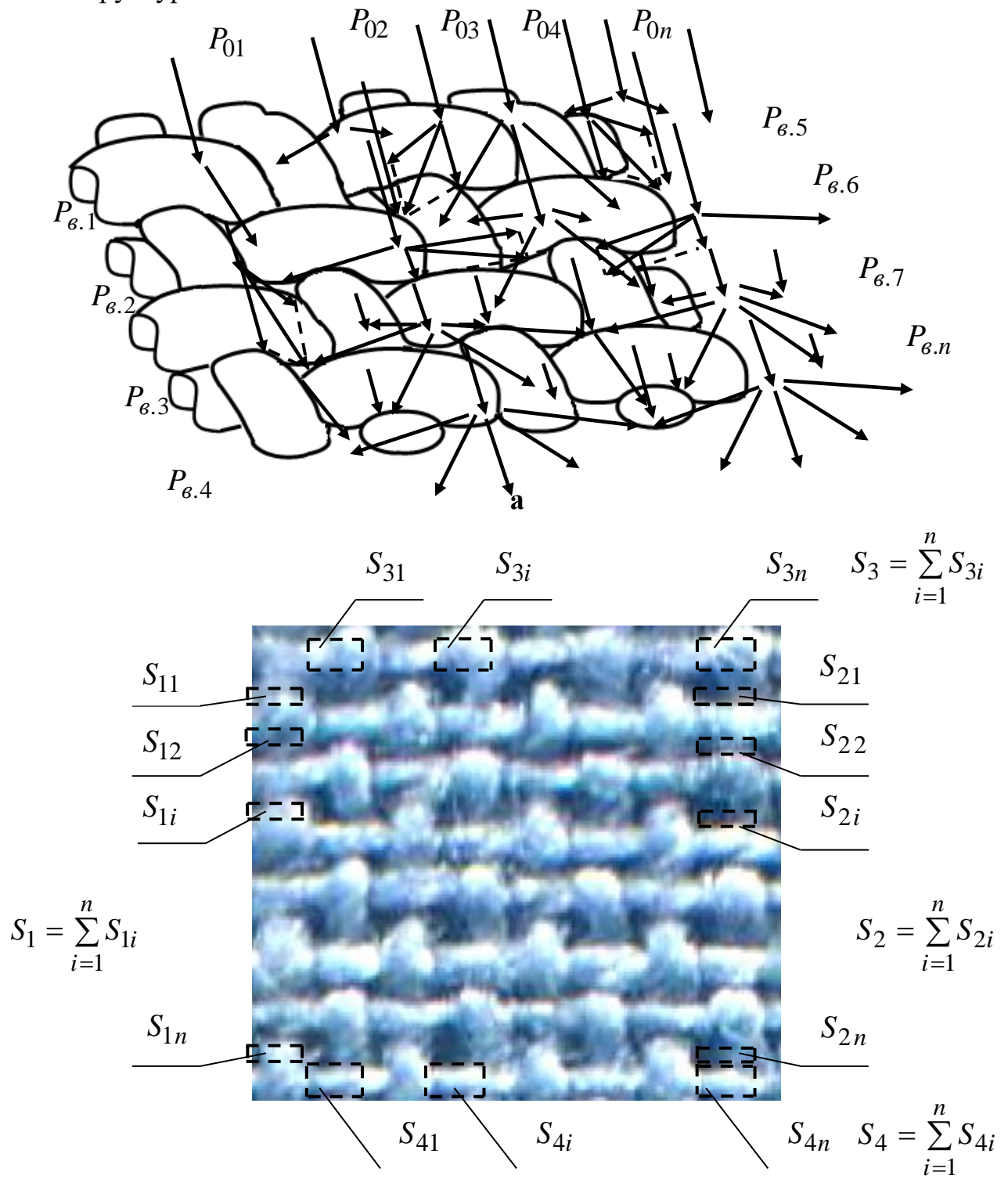
При цьому тиски з $P_{np.1}$ до $P_{np.n}$ в одному випадку відносяться до хвиль, що проходять безпосередньо крізь нитки тканини (рис. 2.2,а,б), а в іншому випадку відносяться до хвиль, які проходять безпосередньо крізь пори тканини (рис. 2.2,в).

Суми точкових площ однакових елементів рапорту тканини, на яких може відбуватися відбиття та накладання хвиль, представлені величинами S_1, S_2, S_3 та S_4 . Тоді загальна площа, яку займає тканина, дорівнюватиме $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$.

Проходження ультразвукових хвиль крізь нитки, що переплітаються, може супроводжуватися перевідбиттям їх на межі середовищ ниток основи та утку тканини. Розглянуті хвилі пройшовши повітряне середовище потрапляють в середовище ниток тканини, при цьому, якщо нитки мають різну лінійну густину, то може відбуватися часткове їхнє відбиття.

Зазначене може відбуватися як на межі середовищ ниток основи та утку, так і на межі ниток з навколишнім середовищем. Проходження хвиль буде змінюватися в залежності від розміщення ниток в тканині та від густини

волокон у їх складі. Тому більшість тканин потрібно розглядати з урахуванням їхньої структури.



Загальна площа, яку займає тканина дорівнює $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$

Рисунок 2.1 - Розсіювання та накладання ультразвукових хвиль на поверхні тканини: а – при падінні їх на тканину; б – умовні ділянки площі тканини, на яких може відбуватися розсіювання та накладання хвиль

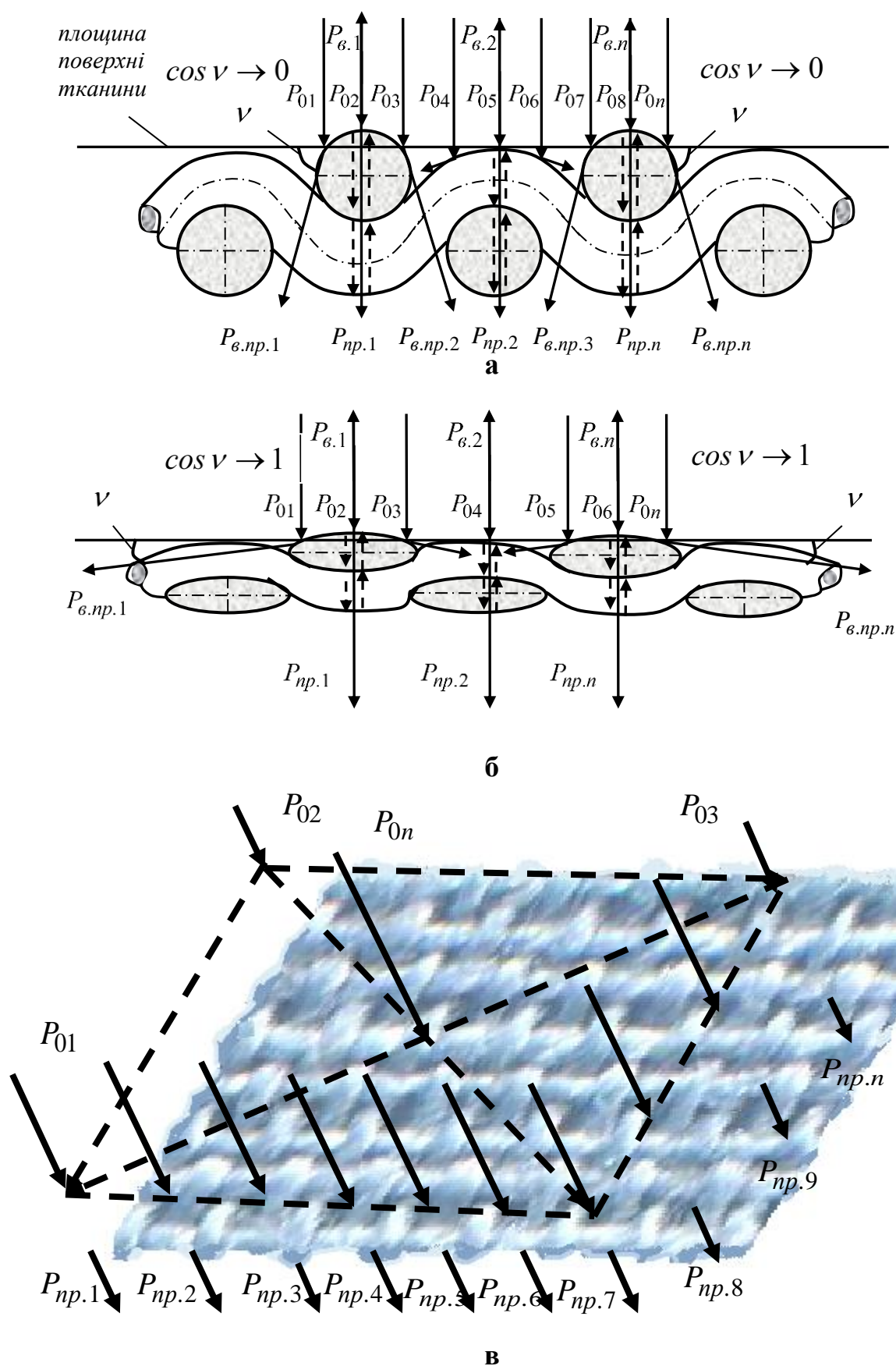


Рисунок 2.2 - Проходження та відбиття хвиль від тканини:

а – зі структурою рихлого шару; б – зі структурою, що наближається до плоского шару; в – проходження ультразвукового сигналу крізь пори тканини

Для того, щоб отримати математичну модель впливу тканини на амплітуду ультразвукової хвилі, необхідно розглянути та математично описати її об'єм D , з якого витісняється повітря у просторі розповсюдження хвилі, а потім вже розглянути і її поверхневу густину η .

Виразимо середню довжину ниток основи та утку для тканини полотняного переплетіння як:

$$L_c = \pi d_c \frac{n}{2}, \quad (2.1)$$

де d_c – середній діаметр ниток основи і утку з діаметрами d_o , d_y ;

n – загальна кількість ниток основи та утку разом узятих у тканині.

Звідки величину n можна визначити як:

$$n = \frac{2\sqrt{S}}{d_c(K_o + K_y)}, \quad (2.2)$$

де S – площа, яку займає тканина;

K_o, K_y – коефіцієнти, які враховують відстані між нитками основи, утку та їх деформацію в переплетінні між собою.

Коефіцієнти K_o , K_y враховують відстані між нитками основи, утку, а також зміну їхніх діаметрів внаслідок деформації ниток та зміну відстаней між ними внаслідок зміни пор тканин.

Частина розрахункових параметрів представлена коефіцієнтами K_o та K_y , які, в свою чергу, пов'язані також із структурними показниками тканин. Зазначені коефіцієнти можна розглянути з врахуванням різних випадків, коли немає деформації ниток в тканині з малими відстанями між їхніми центрами, коли є деформація ниток основи з малими відстанями між їхніми центрами (проміжний випадок), та коли деформовані усі нитки тканини з великими відстанями між їхніми центрами.

Для тканин без деформацій ниток та з малими відстанями між їхніми центрами коефіцієнти K_o та K_y можна подати як:

$$\begin{aligned} K_o &= \frac{K_{1o} + K_{2o}}{2} = \frac{1 + \cos \beta_2}{2}, \\ K_y &= \frac{K_{1y} + K_{2y}}{2} = \frac{1 + \cos \beta_1}{2}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

звідки для одного перерізу тканини, перпендикулярного ниткам основи, проміжні коефіцієнти K_{1o} та K_{1y} можна представити так:

$$K_{1o} = \frac{d_o}{d_o} = 1, \quad K_{1y} = \frac{d_y \cos \beta_1}{d_y}, \quad (2.4)$$

де β_1 – кут між площиною, яка паралельна поверхні тканини, та площиною, що перпендикулярна вісі нитки утку.

Для іншого перерізу тканини, який перпендикулярний ниткам утку, проміжні коефіцієнти K_{2o} та K_{2y} можна представити як:

$$K_{2o} = \frac{d_o \cos \beta_2}{d_o}, \quad K_{2y} = \frac{d_y}{d_y} = 1, \quad (2.5)$$

де β_2 – кут між площиною, яка паралельна поверхні тканини, та площиною, що перпендикулярна вісі нитки основи.

Для тканин з деформацією ниток основи, з малими відстанями між їхніми центрами коефіцієнти K_o та K_y можна подати так:

$$\begin{aligned} K_o &= \frac{K_{1o} + K_{2o}}{2} = \frac{b_o + a_o \cos \beta_2}{2d_o}, \\ K_y &= \frac{K_{1y} + K_{2y}}{2} = \frac{1 + \cos \beta_1}{2}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де b_o, a_o – довжина більшої та меншої сторін еліпса перерізу деформованої нитки основи.

У цьому випадку K_{1o} , K_{1y} , K_{2o} та K_{2y} можна записати як:

$$\begin{aligned} K_{1o} &= \frac{b_o}{d_o}, \quad K_{1y} = \frac{d_y \cos \beta_1}{d_y}, \\ K_{2o} &= \frac{a_o \cos \beta_2}{d_o}, \quad K_{2y} = \frac{d_y}{d_y} = 1. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Для тканин з деформацією ниток основи та утку з великими відстанями

між їхніми центрами коефіцієнти K_o та K_y можна подати так:

$$K_o = \frac{K_{1o} + K_{2o}}{2} = \frac{b_o + l_y + a_o \cos \beta_2}{2d_o}, \quad (2.8)$$

$$K_y = \frac{K_{1y} + K_{2y}}{2} = \frac{b_y + l_o + a_y \cos \beta_1}{2d_y},$$

де b_y, a_y – довжина більшої та меншої сторін еліпса перерізу деформованої нитки утоку;

l_o – довжина, яка разом із $a_o \cos \beta_2$ становлять відстань між найближчими суміжними нитками утоку;

l_y – довжина, яка разом із $a_y \cos \beta_1$ становлять відстань між найближчими суміжними нитками основи.

Тоді проміжні коефіцієнти K_{1o} , K_{1y} , K_{2o} та K_{2y} для даного випадку можна показати як:

$$\begin{aligned} K_{1o} &= \frac{b_o + l_y}{d_o}, & K_{1y} &= \frac{a_y \cos \beta_1}{d_y}, \\ K_{2o} &= \frac{a_o \cos \beta_2}{d_o}, & K_{2y} &= \frac{b_y + l_o}{d_y}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Зазначені вирази допоможуть описати різні випадки проходження хвилі крізь складну неоднорідну структуру тканини. На рис. 2.3 та рис. 2.4 показані різні перерізи тканин для розглянутих вище випадків.

Коефіцієнти K_o та K_y опосередковано пов'язані з порами між нитками тканини, які впливають на амплітуду ультразвукового сигналу з незмінною частотою, а саме їх форма, розміри та деформація ниток. Форма пор може бути різною в залежності від діаметру ниток та густини їх розміщення в тканині. Квадратна форма пор забезпечується використанням ниток однакового діаметру, з волокон одного виду, з рівною густиною їх розміщення, або з більшою густиною розміщення ниток з меншим діаметром, порівняно до ниток, що їх перекривають. Використовуючи нитки основи та утоку з одного виду волокон, але з різними діаметрами та з однаковою

густиною розміщення, форма пор буде мати вид прямокутника. У випадку, коли тканина має високу густину розміщення ниток основи та утку наскрізні пори майже зникають і повітря вже

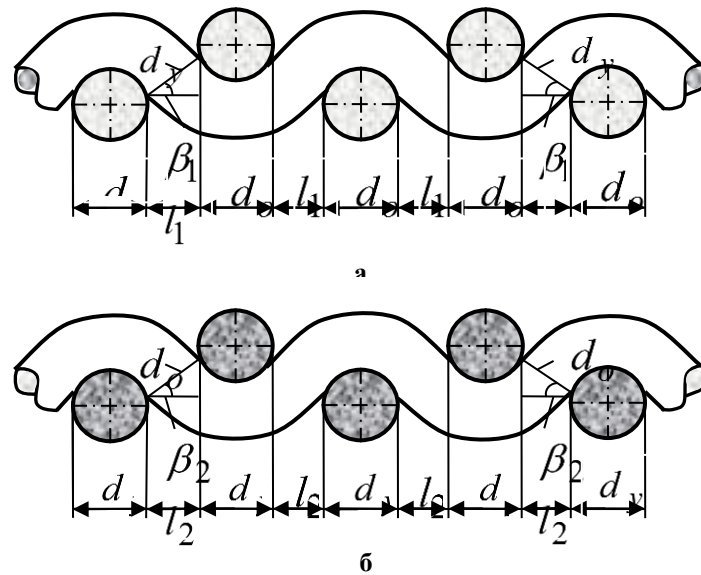


Рисунок 2.3 - Перерізи тканини полотняного переплетіння без деформацій ниток з малими відстанями між їхніми центрами:
а – переріз тканини, який виконано перпендикулярно до ниток основи;
б – переріз тканини, який виконано перпендикулярно до ниток утку

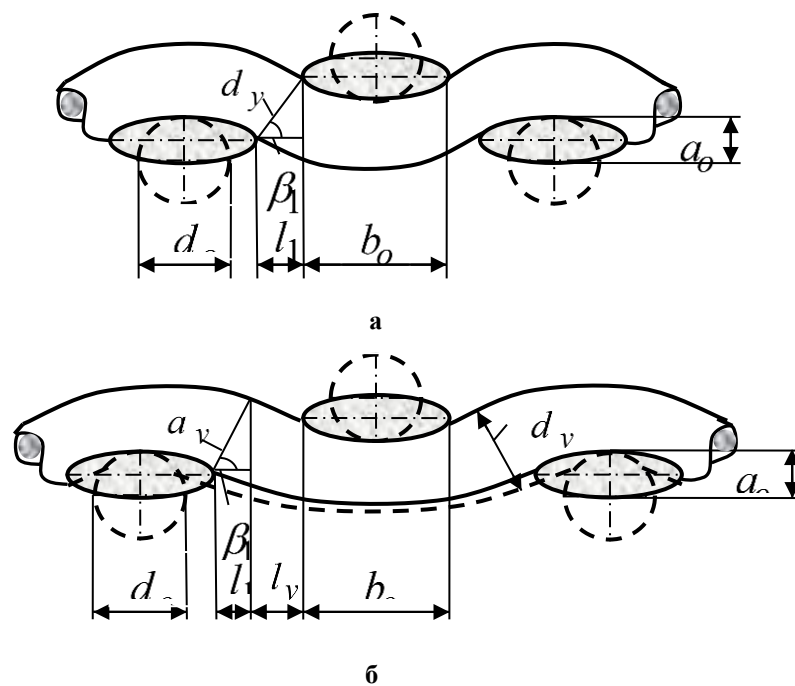


Рисунок 2.4 - Перерізи тканин з деформацією ниток:

а – з деформацією ниток основи з малими відстанями між їхніми центрами;
б – з деформацією ниток основи та утку з великими відстанями між їхніми центрами

не проходить вільно крізь них. Проте для ультразвукової хвилі вільний хід може залишатися, в залежності від того, який розмір діаметрів ниток, або яка середня відстань між їхніми центрами.

В загальному об'єм D для тканини полотняного переплетіння з нитками без деформацій, виключаючи об'єм пор, можна показати у наступному вигляді:

$$D = n^2 d_c^3 \frac{\pi^2}{8} . \quad (2.10)$$

Об'єм повітря в наскрізних порах тканини полотняного переплетіння може змінюватись при розглянутій вище деформації ниток, при різних порядках фази будови (теорія фазової будови тканин Н. Г. Новікова), а також при зміні розмірів самих пор між нитками. Щоб отримати залежність, яка б описувала об'єм тканин полотняного переплетіння, об'єм тканин інших переплетінь, а також можливі зміни об'єму при описаних вище умовах, необхідно враховувати фактичний об'єм, який займає повітря в усіх порах. Загальний об'єм D , який може займати тканина різного виду переплетіння, можна подати так:

$$D = n^2 d_c^3 \frac{\pi^2}{8 K_V} , \quad (2.11)$$

де K_V – коефіцієнт об'єму повітря між нитками основи та утку.

Коефіцієнт K_V є співвідношенням розрахункового значення об'єму пор тканини до його фактичного значення ($K_V = Q/Q_\phi$, $Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$, де $q_1 \div q_n$ – об'єми окремих пор тканини, які займає повітря). На рис. 2.5 показано, які параметри призводять до нерівності коефіцієнтів об'єму повітря $K_{V0} < K_{V1} < K_{V2}$ на прикладі трьох різних тканин з відповідними об'ємами

окремих пор $q_1^0 \div q_n^0$, $q_1^1 \div q_n^1$ та $q_1^2 \div q_n^2$. Отже, знаючи об'єм D поверхневу густину η , в загальному випадку, можна показати як:

$$\eta = n^2 d_c^3 \frac{\pi^2}{8 K_V} \cdot \frac{\rho}{S} = \frac{D \rho}{S}, \quad (2.12)$$

де ρ – середня об'ємна густина ниток тканини.

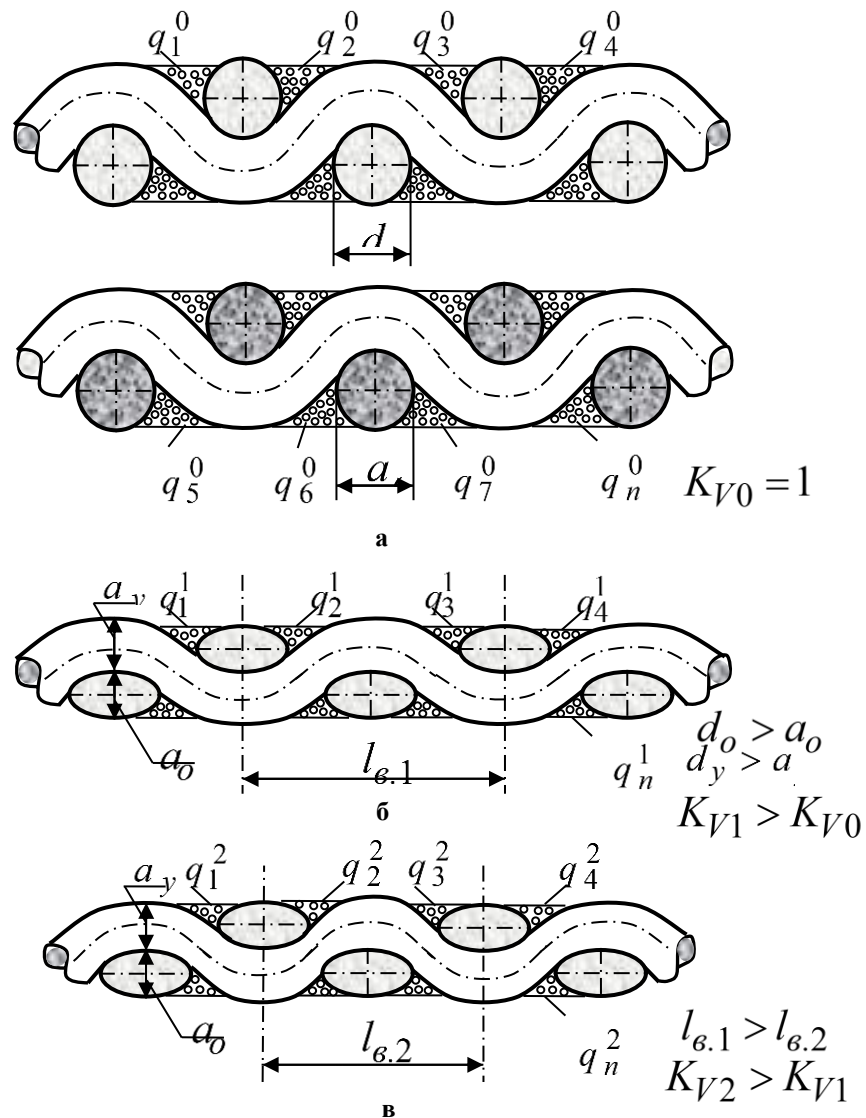


Рисунок 2.5 - Вплив різних параметрів тканин на об'єм пор:

а – об'єм пор в перерізах тканини без деформацій ниток;

б – об'єм пор в перерізах тканини з деформацією ниток;

в – об'єм пор в перерізах тканини з деформацією ниток та із малими відстанями між ними

Проведені дослідження доводять, що пори сильно можуть впливати на проходження ультразвукового сигналу крізь контрольовану тканину та відбиття від неї. Тому пори необхідно враховувати, а також контролювати зміну їхнього об'єму за допомогою параметрів ультразвукових хвиль.

Для того, щоб отримувати точні дані вимірювання необхідно описати як впливає поверхнева густина η контрольованої тканини на амплітуду ультразвукових коливань. Якщо описувати зміну поверхневої густини η за зміною діаметрів ниток основи та утку, то середню відстань проходження та згасання ультразвукового сигналу в матеріалі тканини можна представити як $2d_c\pi/4$, оскільки крім перерізу ниток, який в ідеальному випадку має вигляд кола, переріз волокон, з яких складаються нитки, теж буде таким. Тому амплітуду ультразвукових хвиль, які пройшли крізь тканину з поверхневою густиною η , що відповідає певним величинам діаметрів ниток цієї тканини, можна подати різними виразами.

Створення нового методу визначення поверхневої густини η вимагає чіткого уявлення та пояснення процесів, які мають місце при проходженні ультразвукових хвиль крізь тканини з різною структурою та при відбитті коливань від них. Якщо структура тканини з великими порами, без значних деформацій ниток, то вона наближається до рихлісного шару. У такому випадку ультразвуковий сигнал в основному буде проходити крізь пори тканини. При значних деформаціях ниток та при високій густини їх заповнення структура тканини може наближатися до плоского шару, а ультразвуковий сигнал буде проходити вже безпосередньо крізь нитки контрольованої тканини.

Отже, для точного визначення поверхневої густини η необхідно провести аналіз проходження ультразвукових хвиль крізь тканини та відбиття від них.

2.2. Аналіз проходження безперервного ультразвукового сигналу крізь тканину, що контролюється, і відбиття від неї з урахуванням згасання

Тканина, що контролюється, має нитки основи з діаметром d_o і нитки утку з діаметром d_y . Проведемо аналіз проходження крізь тканину плоскої ультразвукової хвилі при її нормальному падінні. Процес проходження будемо розглядати з урахуванням багаторазових відбивань та накладань хвиль, використовуючи принцип суперпозиції [57].

Знайдемо комплексний коефіцієнт проходження. Нехай тиск у падаючій хвилі дорівнює P_0 , а в тій, що пройшла матеріал – P_{np} . Для визначення коефіцієнту проходження необхідно знайти відношення тиску у хвилі, що пройшла крізь тканину, до тиску у хвилі, яка падає на неї. Акустичний опір середовища, з якого падає хвиля, дорівнює Z_1 , матеріалу ниток основи – Z_2 , матеріалу ниток утку – Z_3 , середовища, в яке падає хвиля після проходження – Z_4 ($Z = \rho c$, де ρ і c відповідно густина середовища і швидкість розповсюдження в ньому ультразвукової хвилі).

Тиск у хвилі, після проходження тканини, можна подати у вигляді суперпозиції тисків у хвилях [58-60]:

$$\begin{aligned}
 P_{np} = \sum_{i=1}^N P_i = P_0 & ((G_1 W_{12} W_{24}' + G_2 W_{12}'' W_{24}) \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \\
 & + (G_3 W_{12}' W_{23} W_{34}' + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24}) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} + \\
 & + (G_1 W_{12} W_{24}' V_{24} V_{21} + G_2 W_{12}'' W_{24} V_{24} V_{21}) \cdot e^{3jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \\
 & + (G_3 W_{12}' W_{23} W_{34}' V_{21} V_{34} (1 + V_{23}) (1 + V_{32}) + \\
 & + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24} V_{31} V_{24} (1 + V_{32}) (1 + V_{23})) \cdot e^{6jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} + \dots)
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Тоді комплексний коефіцієнт проходження можна визначити як:

$$\begin{aligned}
W = \frac{P_{np.}}{P_0} = & G_1 W_{12} W_{24}' \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
& + G_2 W_{12}'' W_{24} \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
& + G_3 W_{12}' W_{23} W_{34} \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{21} V_{34} (1 + V_{23}) (1 + V_{32}) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N + \\
& + G_4 W_{13}' W_{32} W_{24} \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{31} V_{24} (1 + V_{32}) (1 + V_{23}) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N,
\end{aligned} \tag{2.14}$$

де W і V – відповідні коефіцієнти проходження і відбиття хвиль на межах відповідних середовищ (перший індекс позначає середовище, з якого падає хвиля, а другий – середовище, в яке проходить, або, від якого відбивається хвиля, верхніми позначками над індексом показано скільки разів відбувалось накладання хвиль);

N – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює $0, 1, 2, 3, \dots, \infty$;

K_2 – хвильове число матеріалу ниток основи;

K_{23} – середнє хвильове число ниток основи і утку;

$G_1 \div G_4$ – коефіцієнти площі розсіювання потоку енергії ультразвукових коливань;

$d_o \frac{\pi}{4}, 2d_c \frac{\pi}{4}$ – величини, що визначають середню відстань проходження і

згасання ультразвукового сигналу в матеріалі ниток основи, основи і утку разом.

Коефіцієнти площі розсіювання потоку енергії ультразвукових коливань $G_1 \div G_4$ представляють собою добутки величин коефіцієнтів площ $g_1' \div g_4'$ та коефіцієнтів часткового впливу відбиття на ультразвуковий сигнал $g_1'' \div g_4''$. Сума коефіцієнтів площ різних ділянок контрольованої тканини, на які падають і розсіюються хвилі, дорівнює $g_1' + g_2' + g_3' + g_4' = 1$. Коефіцієнти $g_1'' \div g_4''$ є показниками відбиття хвиль від межі середовищ ниток основи та утку при їхніх різних акустичних опорах всередині тканини при взаємному перекритті.

Коефіцієнти $G_1 \div G_4$ при однорідних волокнах в нитках тканини, можна подати так:

$$\begin{aligned}
 G_1 &= g'_1 g''_1 = g'_1 \cdot 1 = g'_1, \\
 G_2 &= g'_2 g''_2 = g'_2 \cdot 1 = g'_2, \\
 G_3 &= g'_3 g''_3 = g'_3 \cdot \frac{\sum_{N=0}^{\infty} \left((1 - (1 - V_{21} V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32})) \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N}{\sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{21} V_{34} (1 + V_{23})(1 + V_{32}) \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N}, \\
 G_4 &= g'_4 g''_4 = g'_4 \cdot \frac{\sum_{N=0}^{\infty} \left((1 - (1 - V_{31} V_{24})(1 + V_{32})(1 + V_{23})) \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N}{\sum_{N=0}^{\infty} \left(V_{31} V_{24} (1 + V_{32})(1 + V_{23}) \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}} \right)^N}.
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Вираз (2.14) є сумою нескінченно спадної геометричної прогресії. Суму такої прогресії, зробивши підстановку (2.15) у (2.14), можна показати як:

$$\begin{aligned}
 W &= \left(g'_1 W_{12} W'_{24} + g'_2 W_{12} W_{24} \right) \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \\
 &\quad \left(g'_3 W'_{12} W_{23} W_{34} + g'_4 W'_{13} W_{32} W_{24} \right) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \times \\
 &\quad \times \left(1 - \left((g'_1 + g'_2) \cdot V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + (g'_3 (1 - (1 - V_{21} V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32}))) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + g'_4 (1 - (1 - V_{31} V_{24})(1 + V_{32})(1 + V_{23}))) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right) \right)^{-1}.
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Для того, щоб записати залежність (2.16) у простішій формі, представимо її наближеною формулою, з досить малим відхиленням в результатах розрахунку.

Спочатку замінімо коефіцієнти g''_3 , g''_4 на величини g'''_3 та g'''_4 , які показуватимуть на скільки змінюється при відбитті частини енергії від межі середовищ ниток основи та утоку ультразвуковий сигнал, що їх проходить,

при взаємному перекритті ниток у контрольованій тканині.

Отже, запишемо коефіцієнти G_3 та G_4 в наступному вигляді:

$$G_3 = g'_3 g'''_3 = g'_3 \frac{1}{(1+V_{23})(1+V_{32})}, \quad (2.17)$$

$$G_4 = g'_4 g'''_4 = g'_4 \frac{1}{(1+V_{32})(1+V_{23})}.$$

Отримані вирази дають можливість проводити детальний розрахунок та аналіз взаємодії ультразвукових хвиль з нитками тканин із різними акустичними опорами, що сильно відрізняються один від одного. Ці залежності допоможуть детально проаналізувати взаємодію ультразвукових хвиль з тканинами з різною структурною будовою, навіть за наближеною формулою виразу (2.16). Цю залежність, підставляючи рівняння (2.17) в (2.14) та після деяких перетворень, можна подати так:

$$\begin{aligned} W = & \left((g'_1 W_{12} W'_{24} + g'_2 W_{12} W_{24}) \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \right. \\ & + \left(g'_3 \frac{W'_{12} W_{23} W_{34}}{(1+V_{23})(1+V_{32})} + g'_4 \frac{W'_{13} W_{32} W_{24}}{(1+V_{32})(1+V_{23})} \right) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \Big) \times \\ & \times \left(1 - \left((g'_1 + g'_2) \cdot V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (g'_3 V_{21} V_{34} + g'_4 V_{31} V_{24}) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right) \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

або

$$\begin{aligned} W = & \left((G_1 W_{12} W'_{24} + G_2 W_{12} W_{24}) \cdot e^{jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \right. \\ & + (G_3 W'_{12} W_{23} W_{34} + G_4 W'_{13} W_{32} W_{24}) \cdot e^{2jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \Big) \times \left(1 - \left((G_1 + G_2) \cdot V_{24} V_{21} \cdot e^{2jK_2 d_o \frac{\pi}{4}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (G_3 V_{21} V_{34} (1+V_{23})(1+V_{32}) + G_4 V_{31} V_{24} (1+V_{32})(1+V_{23})) \cdot e^{4jK_{23} d_c \frac{\pi}{4}} \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

При схожих акустичних опорах ниток основи і утку ($Z_2 \approx Z_3$) з досить

малими порами між ними ($G_1 = G_2 \approx 0$), якщо по обидва боки контрольованої тканини знаходиться одне і теж середовище ($Z_1 = Z_4$), то вираз (2.16) та (2.19) для коефіцієнту проходження W можна представити у вигляді:

$$W = \frac{(G_3 + G_4) W_{12}' W_{21} e^{2jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}{1 - (G_3 + G_4) V_{21} V_{21} e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}. \quad (2.20)$$

Оскільки ($G_3 + G_4 \approx 1$), залежність (2.20) можна подати наступному вигляді:

$$W = \frac{W_{12}' W_{21} \cdot e^{2jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}}{1 - V_{21} V_{21} \cdot e^{4jK_{23}d_c \frac{\pi}{4}}} = \frac{W_{12}' W_{21} \cdot e^{jK_{23}d_{oy} \frac{\pi}{4}}}{1 - V_{21} V_{21} \cdot e^{2jK_{23}d_{oy} \frac{\pi}{4}}}, \quad (2.21)$$

де d_{oy} – сума діаметрів нитки основи та нитки утку.

Відповідні значення для W і V можна записати як:

$$\begin{aligned} W_{12} &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, & V_{12} &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \\ W_{13} &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_3}, & V_{13} &= \frac{Z_1 - Z_3}{Z_1 + Z_3}, \\ W_{21} &= \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, & V_{21} &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \\ W_{12}' &= \frac{2Z_1 M}{Z_1 + Z_2}, & W_{13}' &= \frac{2Z_1 M}{Z_1 + Z_3}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

У тому випадку, коли є згасання ультразвукового сигналу в матеріалі тканини, хвильове число K_{23} стає комплексним і його можна показати у вигляді:

$$K_{23} = \frac{2\pi f}{c_2} + j\alpha, \quad (2.23)$$

де c_2 – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в тканині;

f – частота ультразвукових коливань;

α – коефіцієнт згасання ультразвукового сигналу в матеріалі тканини.

Після підстановки залежностей (2.22) і (2.23) у вираз (2.21) та

нескладних математичних перетворень комплексний коефіцієнт проходження W можна представити у вигляді:

$$-\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \left(e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(-\alpha + j\frac{2\pi f}{c_2}\right)} - e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(\alpha - j\frac{2\pi f}{c_2}\right)} \right) \right)^{-1}, \quad (2.24)$$

$$W = 2M \cdot \left(\left(e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(-\alpha + j\frac{2\pi f}{c_2}\right)} + e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(\alpha - j\frac{2\pi f}{c_2}\right)} \right) - \right.$$

або

$$W = \frac{M}{\cos\left(\frac{d_{oy}\pi^2 f}{2c_2} + jd_{oy}\frac{\pi}{4}\alpha\right) - j\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{d_{oy}\pi^2 f}{2c_2} + jd_{oy}\frac{\pi}{4}\alpha\right)}, \quad (2.25)$$

де M – величина, що характеризує накладання частини відбитої та падаючої ультразвукових хвиль, а також їхнє проходження крізь тканину.

Значення M можна записати як:

$$M = \frac{e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(-\alpha + j\frac{2\pi f}{c_2}\right)(\cos\nu - 1)} - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{\frac{d_{oy}\pi}{4}\left(-\alpha + j\frac{2\pi f}{c_2}\right)(\cos\nu + 1)}}{1 - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{\frac{2d_{oy}\pi}{4}\left(-\alpha + j\frac{2\pi f}{c_2}\right)\cos\nu}}, \quad (2.26)$$

де ν – кут між вектором хвилі, що відбивається від тканини у бік приймаючого перетворювача (перетворювача ультразвукового сигналу в електричну напругу), та самою тканиною.

Для досліджуваних зразків, що за своєю структурою будуть наближатися до плоского шару $\cos\nu \rightarrow 1$, а для тих, які наближаються до структури рихлісного шару (характерно для тканин) $\cos\nu \rightarrow 0$.

Комплексний коефіцієнт проходження W , виділяючи дійсну та уявну його частини, можна подати ще так:

$$W = \text{Re}W + j\text{Im}W = \frac{A}{A^2 + B^2} + j\frac{B}{A^2 + B^2}, \quad (2.27)$$

де $\text{Re}W$, $\text{Im}W$ – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнта проходження W .

Величини A і B із залежності (2.27) можна подати як:

$$A = \left(ch \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot sh \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} \right) \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2}, \quad (2.28)$$

$$B = \left(sh \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot ch \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} \right) \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2}. \quad (2.29)$$

Підставивши вираз (2.26) у (2.25) та врахувавши, що для тканин величина $\left| \frac{2\pi f}{c_2} + j\alpha \right| d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \ll 1$, дійсну $\text{Re} W$ та уявну $\text{Im} W$ частини комплексного коефіцієнта проходження W можна представити так:

$$\text{Re} W = \frac{1 + \alpha \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu}{\left(1 + \alpha \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2}, \quad (2.30)$$

$$\text{Im} W = \frac{\frac{2\pi f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu}{\left(1 + \alpha \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2}, \quad (2.31)$$

Тоді модуль комплексного коефіцієнта проходження $|W|$

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \alpha \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2}}. \quad (2.32)$$

Коли немає згасання в матеріалі тканини $\alpha = 0$, залежність (2.32) можна подати як:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) d_{oy} \frac{\pi}{4} \cos \nu \right)^2}}. \quad (2.33)$$

Із залежності (2.33) можна виразити суму діаметрів d_{oy} нитки основи та нитки утку:

$$d_{oy} = \sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1} \left(\frac{\pi^2 f}{2c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cos \nu \right)^{-1}, \quad (2.34)$$

Також враховуючи, що для тканини у загальному вигляді поверхневу густину η , записавши рівняння (2.12) після деяких перетворень, можна подати так:

$$\eta = n^2 K_v^{-1} d_{oy}^3 \left(\frac{\pi}{8} \right)^2 \frac{\rho_2}{S}, \quad (2.35)$$

де ρ_2 – середня об’ємна густина тканини, а величина n , відповідно до залежності (2.2), буде дорівнювати:

$$n = \frac{4\sqrt{S}}{d_{oy}(K_o + K_y)}, \quad (2.36)$$

Тоді поверхневу густину η можна записати ще через модуль $|W|$ коефіцієнту проходження, підставивши вирази (2.34), (2.36) у (2.35) та отримавши у результаті залежність:

$$\eta = \left(\frac{\pi\sqrt{S}}{2(K_o + K_y)\sqrt{K_v}} \right)^2 \frac{\sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1}}{\frac{\pi^2 f}{2c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cos \nu} \frac{\rho_2}{S}. \quad (2.37)$$

З виразу (2.37), після деяких перетворень, можна представити модуль коефіцієнту проходження $|W|$ ультразвукового сигналу крізь тканину у наступному вигляді:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_v(K_o + K_y)^2 \eta f \cos \nu}{Z_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \right)^2}}, \quad (2.38)$$

або

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \right)^2}}, \quad (2.39)$$

звідки видно, що модуль $|W|$ буде змінюватися нелінійно в залежності від поверхневої густини η .

Коефіцієнт, який враховує відстані та об’єм повітря між нитками основи, утку та їх деформацію в переплетінні між собою, із залежностей (2.38) та

(2.39), можна подати як:

$$K = K_v (K_o + K_y)^2. \quad (2.40)$$

Зважаючи на те, що $Z_1 \ll Z_2$, нерівність $Z_1 / Z_2 \ll 1$ має місце для повітря (навколишнього середовища) та контрольованої тканини, тоді вираз (2.39) можна записати у кінцевому вигляді так:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)^2}}. \quad (2.41)$$

Комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукового сигналу від тканини V можна представити як:

$$V = 1 - W = \text{Re}V + j \text{Im}V = \frac{A^2 + B^2 - A}{A^2 + B^2} - j \frac{B}{A^2 + B^2}, \quad (2.42)$$

де $\text{Re}V$, $\text{Im}V$ – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту відбиття V .

Модуль комплексного коефіцієнту відбиття $|V|$, знаючи, що відношення акустичних опорів $Z_1 / Z_2 \ll 1$, можна записати у вигляді:

$$|V| = \left(1 + \left(1 - \left(ch \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} \right) \cdot 2 \cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right) \times \right. \\ \times \left(\left(ch \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} \right) \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)^2 + \\ \left. + \left(\left(sh \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot ch \frac{\alpha d_{oy} \pi \cos \nu}{4} \right) \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.43)$$

Коли немає згасання, яке може спричинитися матеріалом тканини, $\alpha = 0$, тоді залежність (2.43) можна подати так:

$$|V| = \sqrt{1 + \frac{1 - 2 \cdot \cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2}}{\left(\cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)^2 + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)^2}}. \quad (2.44)$$

Для тканин нерівність $(\pi^2 f d_{oy} \cos \nu)/(2c_2) \ll 1$ також справджується, тоді вираз (2.44) можна записати у вигляді:

$$|V| = \frac{\left(\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2} \right)^2}}. \quad (2.45)$$

а підставивши залежність (2.34) у (2.45) та спростивши, враховуючи вище згадану нерівність $Z_1/Z_2 \ll 1$, отримаємо:

$$|V| = \sqrt{1 - |W|^2} = |W| \sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1}. \quad (2.46)$$

Якщо зробити підстановку рівняння (2.41) у (2.46) та після нескладних перетворень можна подати модуль $|V|$ комплексного коефіцієнту відбиття як:

$$|V| = \frac{\left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)^2}}. \quad (2.47)$$

Остаточно спростивши вираз (2.47), отримаємо залежність для модуля $|V|$ коефіцієнта відбиття ультразвукового сигналу від тканини у вигляді:

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K \eta f \cos \nu} \right)^2}}. \quad (2.48)$$

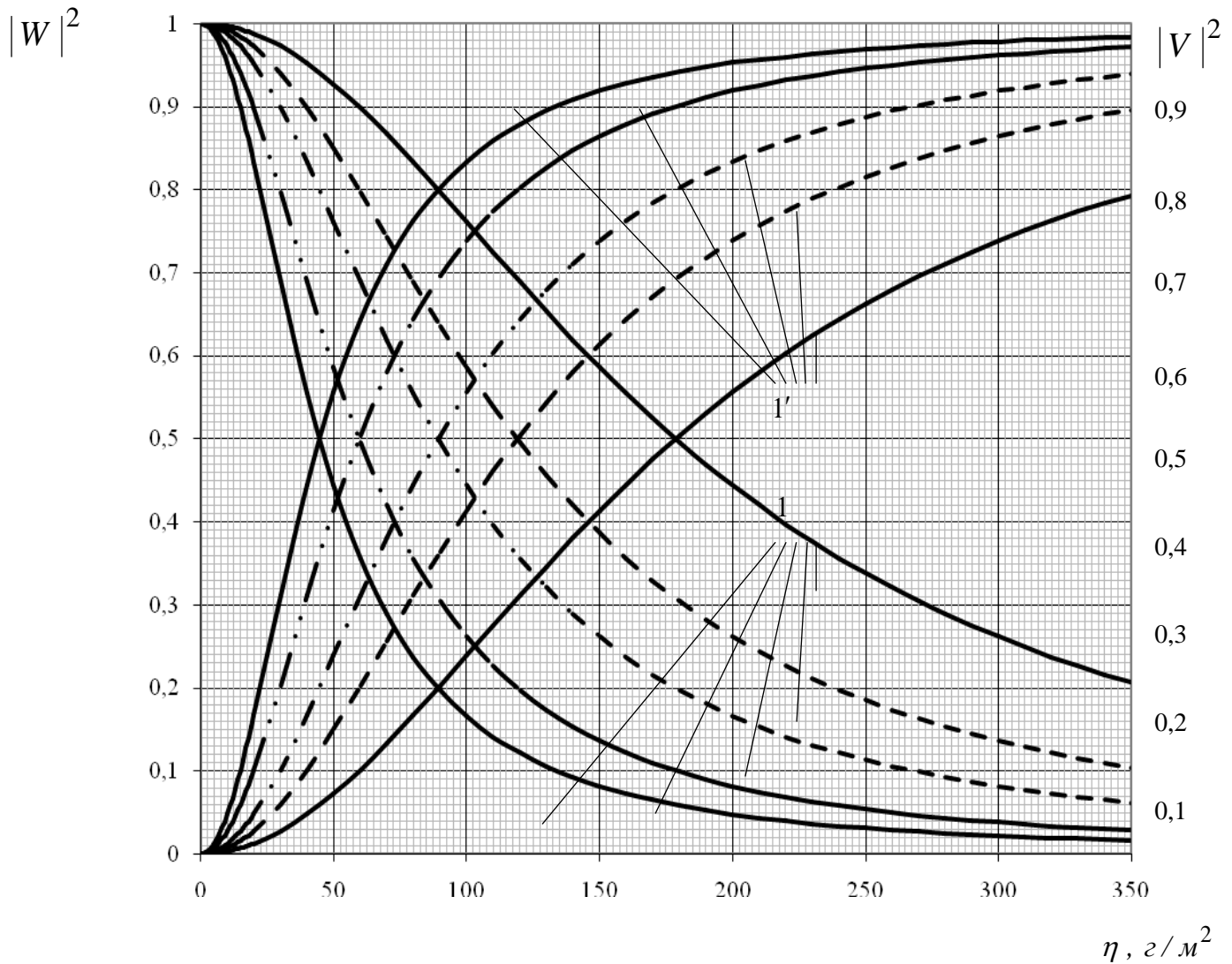







Рисунок 2.6 - Залежності коефіцієнтів проходження $|W|^2(1)$ та відбиття

 $|V|^2(1')$ за енергією від поверхневої густини η тканин

-  - середня відстань між центрами ниток тканин 0,60 мм (1, 1^{1/2});
 - середня відстань між центрами ниток тканин 0,52 мм (1, 1^{1/2});
 - середня відстань між центрами ниток тканин 0,47 мм (1, 1^{1/2});
 - середня відстань між центрами ниток тканин 0,39 мм (1, 1^{1/2});
 - середня відстань між центрами ниток тканин 0,35 мм (1, 1^{1/2})

Модуль $|V|$ в дійсності складно визначити за вимірюваннями, оскільки відбите випромінювання буде розсіюватися від тканини. На рис. 2.6 показано як будуть змінюватися коефіцієнти проходження $|W|^2$ та відбиття $|V|^2$ ультразвукового сигналу за енергією від поверхневої густини η тканин.

На рис. 2.6 показано, що криві змінюються в залежності від зміни відстаней між центрами ниток тканин, та відображено закон збереження енергії [61]. З цього закону випливає, що сума енергій сигналу, який пройшов, та сигналу, що відбився від тканини чисельно дорівнює енергії сигналу, який випромінюється п'єзоперетворювачем. Якщо виразити цей закон із залежності (2.46), отримаємо:

$$|W|^2 + |V|^2 = 1. \quad (2.49)$$

Рівняння (2.49) справедливе для більшості контрольованих тканин, проте для деяких з них, до складу яких входять синтетичні нитки, може відбуватися згасання ультразвукового сигналу. Вираз (2.49) буде меншим за одиницю, що впливатиме на інформативність сигналу, тому доцільно розглянути та проаналізувати цей випадок детальніше.

Модуль $|W|$ коефіцієнта проходження з врахуванням згасання для тканин [63], пов'язавши його з поверхневою густиною η , зробивши підстановку виразів (2.28), (2.29), (2.35) у (2.27) та після перетворень, можна записати так:

$$|W| = \left(\left(\left(\left(ch \frac{\alpha K \eta \cos \nu}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha K \eta \cos \nu}{\pi \rho_2} \right) \cdot \cos \frac{2K\eta f \cos \nu}{Z_2} \right)^2 + \left(\left(sh \frac{\alpha K \eta \cos \nu}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot ch \frac{\alpha K \eta \cos \nu}{\pi \rho_2} \right) \cdot \sin \frac{2K\eta f \cos \nu}{Z_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}. \quad (2.50)$$

Вираз (2.50), при виконанні умови $(2K\eta f \cos \nu)/Z_2 \ll 1$, можна подати як:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \alpha \frac{c_2}{Z_1} \frac{K \eta \cos \nu}{2\pi} \right)^2 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)^2}}. \quad (2.51)$$

Зважаючи на те, у якому вигляді показаний вираз (2.50), залежність (2.43) можна записати для ультразвукового сигналу, що відбивається від тканини та згасає [63], в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
|V| = & \left(1 + \left(1 - \left(ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right) \cdot 2 \cos \frac{2K \eta f \cos v}{Z_2} \right) \times \right. \\
& \times \left(\left(\left(ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right) \cdot \cos \frac{2K \eta f \cos v}{Z_2} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left. + \left(\left(sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right) \cdot \sin \frac{2K \eta f \cos v}{Z_2} \right)^2 \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.52)
\end{aligned}$$

Залежність (2.52), за умови $(2K \eta f \cos v)/Z_2 \ll 1$, можна записати так:

$$\begin{aligned}
|V| = & \left(1 + \left(1 - 2 \left(ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right) \right) \times \right. \\
& \times \left(\left(ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left. + \left(\left(sh \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} \cdot ch \frac{\alpha K \eta \cos v}{\pi \rho_2} \right) \cdot \frac{2K \eta f \cos v}{Z_2} \right)^2 \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.53)
\end{aligned}$$

Зрозуміло, що при цьому $(\alpha K \eta \cos v)/(\pi \rho_2) \ll 1$, а вираз (2.53) можна подати як:

$$|V| = \sqrt{1 - \frac{1 + \alpha \frac{c_2}{Z_1} \cdot \frac{K \eta \cos v}{\pi}}{\left(1 + \alpha \frac{c_2}{Z_1} \cdot \frac{K \eta \cos v}{2\pi} \right)^2 + \left(2\alpha \frac{f(K \eta \cos v)^2}{\pi \rho_2 Z_2} + \frac{K \eta f \cos v}{Z_1} \right)^2}}. \quad (2.54)$$

Згасання при проходженні та відбитті хвилі вносить малу похибку при визначенні поверхневої густини η тканини. Вплив згасання у вигляді похибки вимірювання амплітуди ультразвукової хвилі, що пройшла крізь тканину, або хвилі, яка відбилася від неї, найчастіше не перевищує 1%. При цьому на амплітуду ультразвукових коливань сильно впливають структурні показники тканини та пори між її нитками, що необхідно враховувати.

Відстані та розміри пор між нитками тканини можна визначити за допомогою різних параметрів ультразвукових хвиль, а відносну зміну їх амплітуди, що спричиняється згасанням сигналу, можна подати так:

$$\delta_{|W|} = \frac{|W| - |W|_0}{|W|_0} \cdot 100\% = \left(|W| \sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.55)$$

$$\delta_{|V|} = \frac{|V| - |V|_0}{|V|_0} \cdot 100\% = \left(|V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K \eta f \cos \nu} \right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.56)$$

де $\delta_{|W|}$ – відносна зміна модулю коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням;

$\delta_{|V|}$ – відносна зміна модулю коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням;

$|W|_0$ – модуль коефіцієнта проходження без врахування згасання;

$|V|_0$ – модуль коефіцієнта відбиття без врахування згасання.

На рис. 2.7 та на рис. 2.8 показані залежності відносних змін $\delta_{|W|}$, $\delta_{|V|}$ від параметру $\eta/(\rho_2 \lambda_2)$, де λ_2 – довжина ультразвукової хвилі в тканині.

Як показав проведений аналіз, величина амплітуд ультразвукових хвиль, які пройшли крізь контрольовану тканину або відбилися від неї, залежить в основному від розмірів пор та поверхневої густини η тканини при постійній частоті коливань.

Амплітуду ультразвукових хвиль, які пройшли крізь тканину з великими порами, можна представити як результуючий сигнал суперпозиції сигналів, один з яких пройшов крізь пори тканини, а інший, що пройшов крізь її нитки. Більша частина сумарного сигналу проходить крізь пори тканини. При зменшенні розмірів пор амплітуда хвиль, які пройшли крізь них, теж зменшується.

Так як існує взаємозв'язок зміни параметрів тканини з модулями $|W|$ та $|V|$, то для вимірювання поверхневої густини η необхідно враховувати їх. На рис. 2.9 наведено різні вагомні параметри, які впливають на зазначені модулі.

Амплітуда ультразвукової хвилі, яка пройшла крізь систему ниток, може бути більшою для тканини з більшими діаметрами ниток основи та утку, з

меншою об'ємною густиною ρ_2 та з більшими відстанями між її нитками у порівнянні з тканиною, яка може мати зовсім інші параметри.

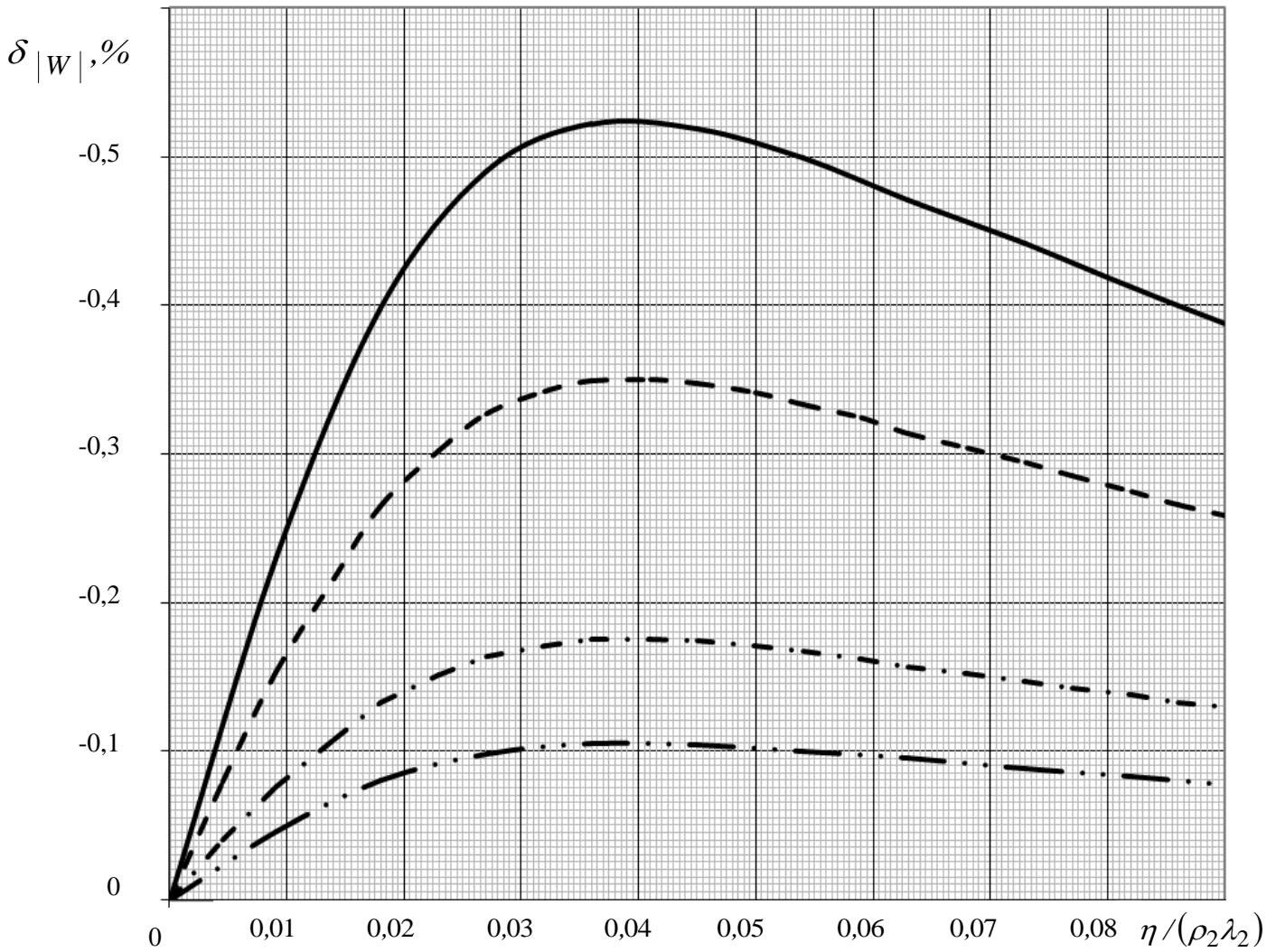


Рисунок 2.7 - Залежності відносної зміни $\delta_{|W|}$ від параметру

$\eta/(\rho_2 \lambda_2)$ при різних значеннях коефіцієнту згасання α

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| — · — · — · — · — · — · | - $\alpha = 3 \text{ м}^{-1}$; |
| — · — · — · — · — · — · | - $\alpha = 5 \text{ м}^{-1}$; |
| - - - - - | - $\alpha = 10 \text{ м}^{-1}$; |
| ————— | - $\alpha = 15 \text{ м}^{-1}$ |

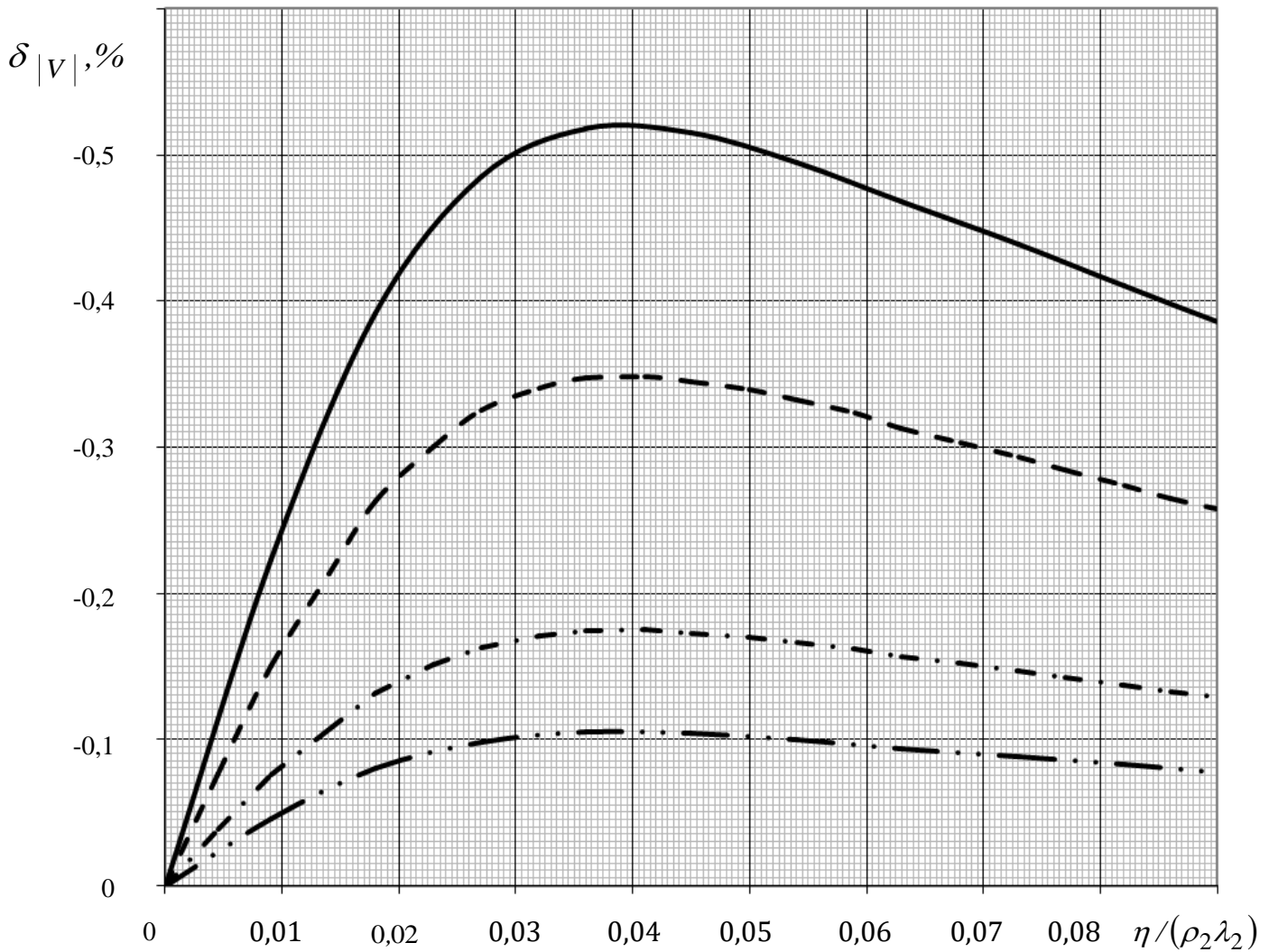


Рисунок 2.8 - Залежності відносної зміни $\delta_{|V|}$ від параметру

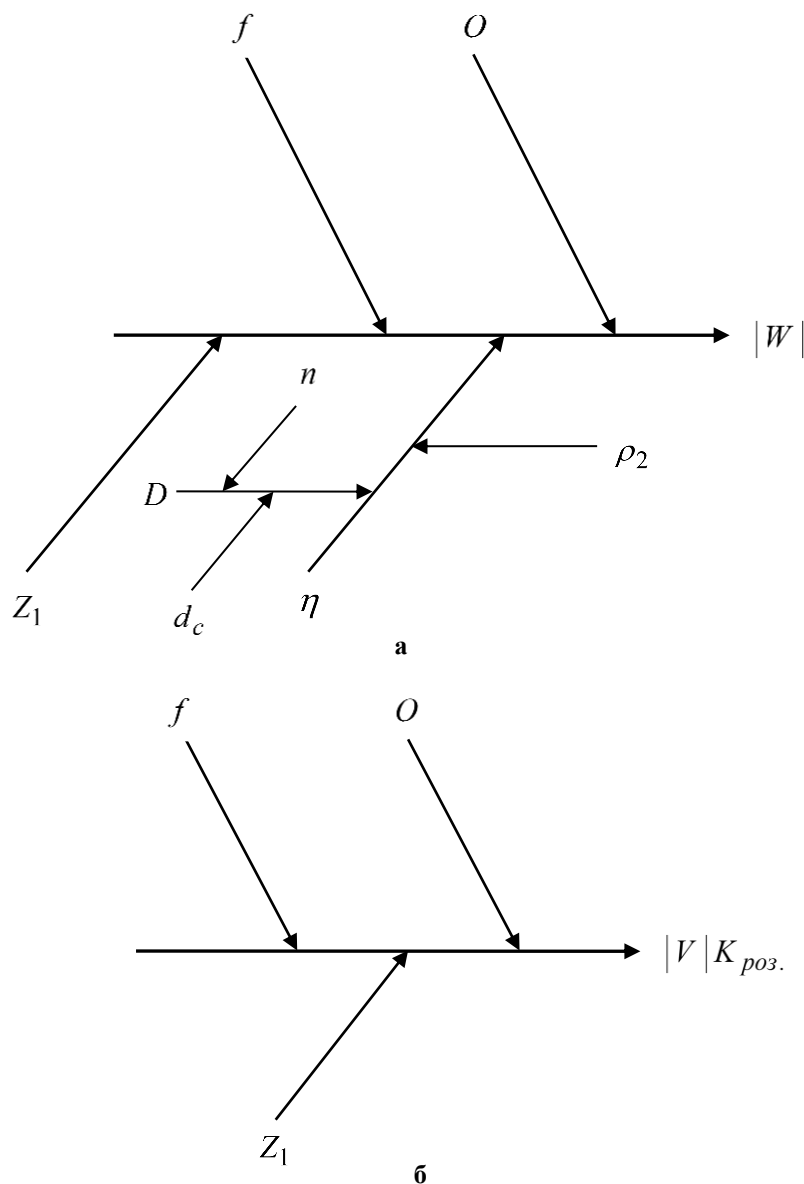
$\eta/(\rho_2 \lambda_2)$ при різних значеннях коефіцієнту згасання α

— · · — · ·	- $\alpha = 3 \text{ м}^{-1}$;
— · — · —	- $\alpha = 5 \text{ м}^{-1}$;
- - - - -	- $\alpha = 10 \text{ м}^{-1}$;
—————	- $\alpha = 15 \text{ м}^{-1}$

Оскільки згасанням для більшості контрольованих тканин можна знехтувати, то амплітуди хвиль (хвилі, яка пройшла, хвилі, яка відбилася, та хвилі, що падає на контрольовану тканину) можна представити, ще як показано на діаграмі, рис. 2.10, у вигляді модулів комплексних коефіцієнтів. Перша діаграма для тканини з поверхневою густиною $\eta = 105 \text{ г/м}^2$ (рис. 2.10,а). Друга діаграма для хвиль, що взаємодіють з тканиною із поверхневою

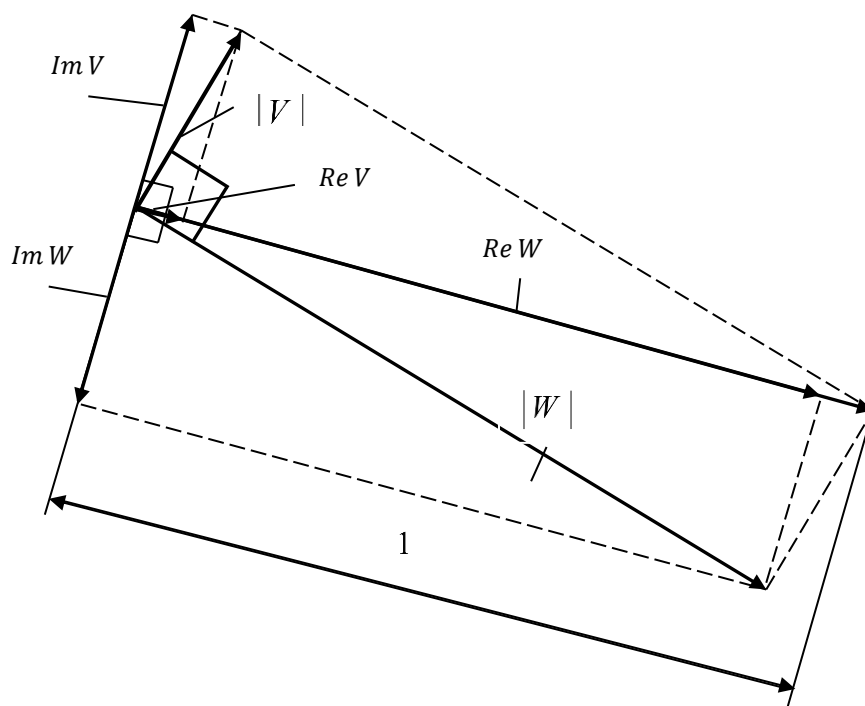
густиною $\eta = 187 \text{ г/м}^2$ (див. рис. 2.10,б). Для другого випадку амплітуда ультразвукової хвилі, яка пройшла тканину, зменшується, а дійсна та уявна частини коефіцієнтів проходження та відбиття змінюються. Дійсна частина коефіцієнту проходження для сигналу, що проходить тканини із більшою поверхневою густиною η при однакових їхніх порах, буде зменшуватися та навпаки.

На рис. 2.11 показано як впливає поверхнева густина η та розміри пор на амплітуду ультразвукової хвилі, яка пройшла крізь контрольовану тканину.

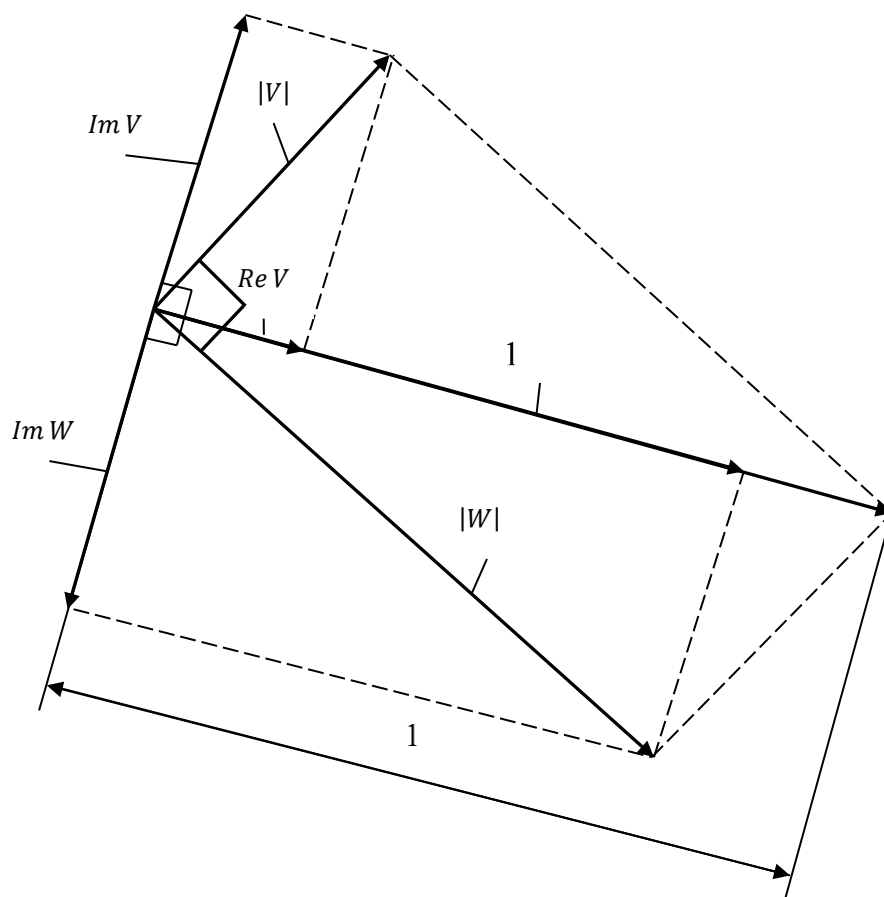


$K_{роз.}$ – коефіцієнт розсіювання ультразвукових хвиль від нерівностей поверхні тканини

Рисунок 2.9 - Діаграми Ісікави для аналізу впливу різних вагомих параметрів: а – на модуль $|W|$; б – на величину $|V|K_{роз.}$



а



б

Рисунок 2.10 - Діаграма амплітуд ультразвукових хвиль (хвилі, яка пройшла “ $|W|$ ”, хвилі, яка відбилася “ $|V|$ ”, і хвилі, що падає на тканину “1”):

а – для тканини з $\eta = 105 \text{ г/м}^2$; б – для тканини з $\eta = 187 \text{ г/м}^2$

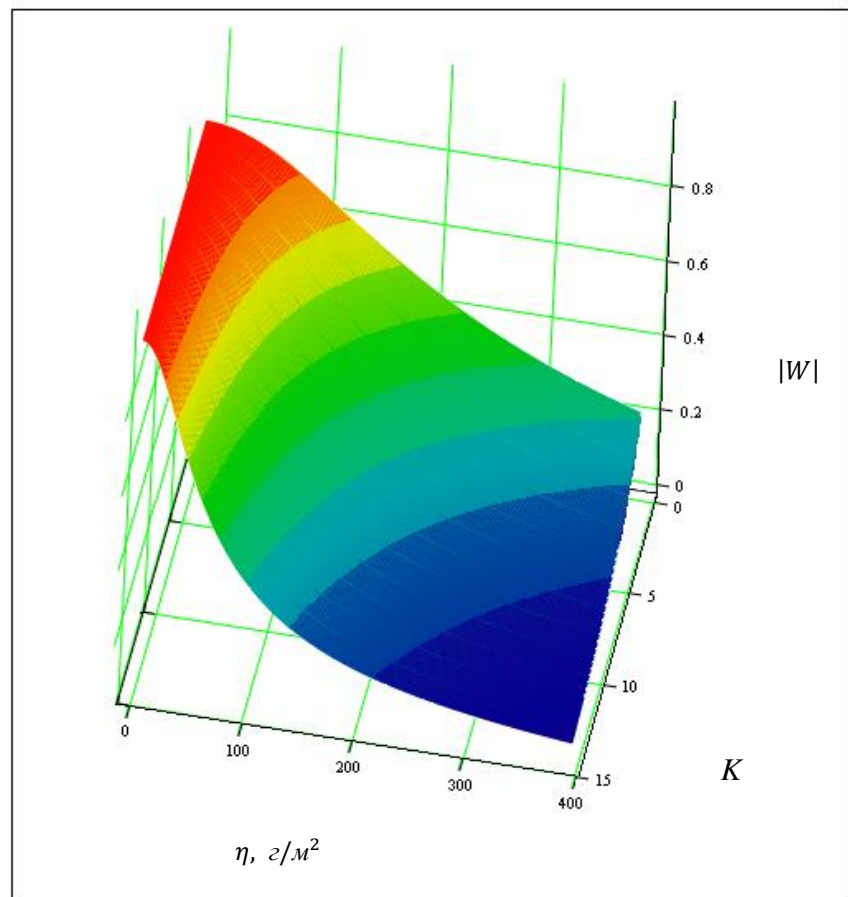


Рисунок 2.11 - Поверхня, яка показує вплив поверхневої густини η та зміни розмірів пор, які представлені коефіцієнтом K , на амплітуду ультразвукової хвилі, що пройшла контрольовану тканину і представлена модулем $|W|$

- ділянка поверхні з границями в межах $(0 \leq \eta < 25) \text{ г/м}^2$ та $(0 \leq \eta < 90) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(10 < \eta < 40) \text{ г/м}^2$ та $(50 < \eta < 150) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(25 < \eta < 50) \text{ г/м}^2$ та $(100 < \eta < 200) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(40 < \eta < 75) \text{ г/м}^2$ та $(150 < \eta < 250) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(50 < \eta < 80) \text{ г/м}^2$ та $(200 < \eta < 320) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(75 < \eta < 100) \text{ г/м}^2$ та $(300 < \eta \leq 400) \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(100 < \eta < 150) \text{ г/м}^2$ та $\eta = 400 \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(130 < \eta < 230) \text{ г/м}^2$ та $\eta = 400 \text{ г/м}^2$;
- ділянка поверхні з границями в межах $(200 < \eta \leq 400) \text{ г/м}^2$ та $\eta = 400 \text{ г/м}^2$

З діаграм (рис. 2.10) можна побачити підтвердження залежності (2.42), з якої випливає, що амплітуда падаючої хвилі буде дорівнювати $\operatorname{Re} W + \operatorname{Re} V = 1$, а $\operatorname{Im} W = -\operatorname{Im} V$. Сума квадратів амплітуд ультразвукової хвилі, яка пройшла, та хвилі, що відбилася від тканини, згідно залежності (2.49), дорівнює квадрату амплітуди падаючої хвилі.

Поверхня (рис. 2.11) відображає зміну модулю комплексного коефіцієнта проходження від двох змінних, з якої можна побачити, що при зменшенні об'єму пор в тканині та при збільшенні її поверхневої густини η , амплітуда хвилі, яка пройшла крізь неї, зменшується. Зазначене показує, що для того, щоб контролювати поверхневу густину η безпосередньо на виробництві необхідно забезпечити контроль зміни об'єму пор тканин за допомогою одного з параметрів ультразвукових хвиль, які взаємодіють з тканиною. За амплітудою ультразвукового сигналу, що пройшов крізь тканину, неможливо визначити як змінюються пори в ній, тому що він представляє собою суперпозицію сигналів. У такому випадку необхідно використовувати амплітуду хвиль, що відбиваються від поверхні (решітки ниток) тканини, (рис. 2.9).

Наведені співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль, які взаємодіють з тканиною, та хвиль, що падають на неї, а також наведені залежності різних структурних показників, дали можливість в подальшому визначати поверхневу густину η тканин за допомогою ультразвукових коливань.

Отже, вище наведені основні залежності ультразвукових хвиль, які взаємодіють з контрольованою тканиною, дають змогу проаналізувати та вибрати необхідні параметри коливань для визначення її поверхневої густини η . Було показано, що без згасання $\alpha = 0$, або при досить малому згасанні ультразвукового сигналу ($|\delta_{|w|}| < 2\%$ та $|\delta_{|v|}| < 2\%$) $\alpha \approx 0$, коли відношення акустичних опорів повітря та тканини $Z_1/Z_2 \ll 1$, залежності для амплітуд хвиль, які пройшли крізь контрольовану тканину, та для хвиль, що відбилася

від неї, спрощуються. При цьому немає необхідності у безпосередньому визначенні акустичного опору тканини. Це дасть змогу визначати поверхневу густину η тканин, не знаючи їх об'ємної густини ρ_2 та швидкості розповсюдження c_2 в них ультразвукових коливань.

2.3. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину

Контроль поверхневої густини η тканин, можна проводити як за допомогою безперервного, так і використовуючи імпульсне випромінювання [63]. При використанні безперервного випромінювання може виникати значна похибка вимірювання. Оскільки сигнал, що проходить тканину, представляє собою суперпозицію сигналів, які багаторазово відбивались від ниток, а в тканинах з великою густиною їх заповнення – від поверхонь перетворювачів та від поверхні самої тканини. Аналіз цього процесу дає можливість зробити висновок, що амплітуда ультразвукових хвиль, які пройшли крізь контрольовану тканину, залежить не тільки від поверхневої густини η , розташування ниток, а й від положення самої контрольованої тканини відносно перетворювачів, між якими вона розташовується. Жорстку фіксацію тканини складно забезпечити при контролі поверхневої густини η на реальному виробництві, де мають місце вібрації контрольованої тканини. Таким чином, необхідно застосовувати імпульсне випромінювання, при якому виключаються вище зазначені похибки вимірювання, що підвищує вірогідність контролю.

Розглянемо проходження ультразвукового сигналу крізь контрольовану тканину [63], що має нитки основи з діаметром d_o і нитки утку з діаметром d_y . При цьому тканину з акустичним опором Z_2 , помістили в середовище з акустичним опором Z_1 (в повітряне середовище). У цьому випадку, якщо час проходження імпульсом контрольованої тканини більший за його тривалість,

то проходження сигналом цієї тканини відповідає розповсюдженню в безмежному середовищі. При контролі тканин тривалість імпульсу перевищує час проходження ним контрольованої тканини. У цьому випадку буде відбуватися багаторазове відбиття окремих складових імпульсу від меж ниток тканини і суміжних середовищ. Далі будемо розглядати цей випадок.

Ультразвуковий імпульсний сигнал, що пройшов контрольовану тканину з врахуванням діаметрів ниток основи d_o та утоку d_y , де d_{oy} є сумою цих діаметрів, може бути показаний наступним чином:

$$P_1(t') = P_1\left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega\left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right)} d\omega, \quad (2.57)$$

де $t' = \frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t$ – час з врахуванням затримки ультразвукового сигналу.

Якщо записати вираз (2.57), пов'язавши його з поверхневою густиною η контрольованої тканини, ця залежність буде мати вид:

$$P_1(t') = P_1\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right)} d\omega, \quad (2.58)$$

де $S(\omega)$ – спектральна густина падаючого ультразвукового сигналу;

$W(\omega)$ – комплексний коефіцієнт проходження з врахуванням згасання.

Комплексний коефіцієнт проходження можна подати як:

$$W(\omega) = \frac{W_{12} W_{21} \cdot e^{j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha\right) \frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}}}{1 - V_{21}^2 \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha\right) \frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}}}, \quad (2.59)$$

або

$$W(\omega) = \frac{\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot e^{\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha\right) \frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}}}{1 - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha\right) \frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}}}, \quad (2.60)$$

де $b = \omega^* / \omega_0$ – коефіцієнт відношення несучої колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу.

Вираз (2.60) можна записати ще як суму геометричної прогресії у

вигляді:

$$W(\omega) = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot e^{-\left(2N+1\right)\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha\right)\frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}}, \quad (2.61)$$

Тоді, зробивши підстановку залежності (2.61) в (2.58), ультразвуковий імпульсний сигнал можна показати як:

$$P_1(t') = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-\left(2N+1\right)\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha\right)\frac{K\eta \cos v}{\pi \rho_2}} \times \\ \times e^{j\omega\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right)} d\omega. \quad (2.62)$$

Дослідження показали, що ультразвуковий імпульс, який випромінюється, має дзвіноподібну форму, звуковий тиск в якому можна виразити як:

$$P(t_0) = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{2t \ln \sqrt{2}}{\tau_0}\right)^2} \cdot e^{j\omega_0 t}, \quad (2.63)$$

де P_0 – тиск в хвилі імпульсу, що падає на контрольовану тканину;

τ_0 – тривалість імпульсу;

t_0 – час початку випромінювання падаючих коливань (розглядається $t_0 \approx t'$).

Оскільки вимірюється дійсна частина виразу (2.63), тоді тиск в ультразвуковій хвилі, що падає на тканину, можна подати так:

$$\operatorname{Re} P(t_0) = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{2t \ln \sqrt{2}}{\tau_0}\right)^2} \cdot \cos \omega_0 t. \quad (2.64)$$

Спектральну густину такого сигналу можна показати як [64]:

$$S(\omega) = \frac{P_0 \tau_0 \sqrt{\pi}}{2 \ln \sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_0) \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2}. \quad (2.65)$$

Зробимо підстановку залежності (2.65) в (2.62), тоді ультразвуковий імпульсний сигнал, що пройшов контрольовану тканину, можна подати в такому вигляді:

$$P_1(t') = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \frac{P_0 \tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 - (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha\right) \cdot \frac{K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2} + j\omega\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right)} d\omega. \quad (2.66)$$

Проведемо перетворення виразу (2.66) в показнику експоненти, яке послідовно можна подати так:

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 - (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha\right) \cdot \frac{K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2} + j\omega\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right) = \\ & = -\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 + j(2N+1)\frac{\omega b K\eta \cos \nu}{\pi Z_2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2} - \\ & - j\omega t + j\omega \frac{K\eta}{\pi Z_2} = \frac{-\tau_0^2 \omega^2 + 2\omega_0 \omega \tau_0^2 - \omega_0^2 \tau_0^2}{(4\ln \sqrt{2})^2} + j\frac{\omega b(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi Z_2} - \\ & - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2} - j\omega t + j\omega \frac{K\eta}{\pi Z_2} = -\left(\frac{\tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \\ & + \left(j\frac{b(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi Z_2} + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4\ln \sqrt{2})^2} + j\left(\frac{K\eta}{\pi Z_2} - t\right)\right) \omega - \left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 - \\ & - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2}. \end{aligned} \quad (2.67)$$

Провівши перетворення в показнику експоненти та підставивши вираз (2.67) в (2.66), ультразвуковий імпульсний сигнал після проходження тканини можна представити як:

$$P_1(t') = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \frac{P_0 \tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos \nu}{\pi \rho_2}} \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4\ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\frac{K\eta}{\pi Z_2}(b(2N+1)\cos \nu + 1) - jt + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4\ln \sqrt{2})^2}\right) \omega} d\omega. \quad (2.68)$$

Визначивши інтеграл в (2.68), запишемо імпульсний сигнал в такому вигляді (після перетворень) для дійсної $\text{Re } P_1(t')$ та уявної $\text{Im } P_1(t')$ частин:

$$\begin{aligned}
P_1(t') = \operatorname{Re} P_1(t') + j \operatorname{Im} P_1(t') = P_0 \cdot \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \times \\
\times \left(\cos \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right) + j \sin \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \\
\times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{2\ln\sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta\cos\nu}{\pi\rho_2} \right).
\end{aligned} \tag{2.69}$$

Із залежності (2.69), яка представляє комплексну величину тиску в хвилі імпульсного сигналу, можна тепер виділити дійсну частину $\operatorname{Re} P_1(t')$ та подати її у вигляді:

$$\begin{aligned}
\operatorname{Re} P_1(t') = P_0 \cdot \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right) \times \\
\times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{2\ln\sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta\cos\nu}{\pi\rho_2} \right).
\end{aligned} \tag{2.70}$$

Якщо виділити із залежності (2.69) уявну частину $\operatorname{Im} P_1(t')$ імпульсного сигналу, то її можна подати так:

$$\begin{aligned}
\operatorname{Im} P_1(t') = P_0 \cdot \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right) \times \\
\times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu+1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{2\ln\sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta\cos\nu}{\pi\rho_2} \right).
\end{aligned} \tag{2.71}$$

Вимірюється дійсна частина залежності (2.69), що представляє собою тиск в хвилі ультразвукового імпульсного сигналу, яка пройшла контрольовану тканину.

Амплітуду цієї хвилі, зробивши заміну величин Z_1, Z_2 на $\rho_1 c_1$ та $\rho_2 c_2$, які характеризують акустичні опори повітряного середовища та тканини, або добутки об'ємних щільностей зазначених середовищ та швидкостей розповсюдження в них ультразвукових хвиль, можна показати наступною

залежністю:

$$A_w(t') = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^{2N} \cdot \cos \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu + 1)}{\pi \rho_2 c_2} - t \right) \times$$

$$\times \exp \left(- \frac{\left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu + 1)}{\pi \rho_2 c_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos\nu}{\pi \rho_2} \right). \quad (2.72)$$

Фазовий зсув ультразвукового імпульсного сигналу, що пройшов контрольовану тканину, можна подати у вигляді:

$$\varphi_w = \arctg \frac{\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^{2N} \cdot \exp(Y) \sin \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu + 1)}{\pi \rho_2 c_2} - t \right)}{\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^{2N} \cdot \exp(Y) \cos \omega_0 \left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu + 1)}{\pi \rho_2 c_2} - t \right)}, \quad (2.73)$$

де

$$Y = - \frac{\left(\frac{K\eta(b(2N+1)\cos\nu + 1)}{\pi \rho_2 c_2} - t \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^2} - \frac{\alpha(2N+1)K\eta \cos\nu}{\pi \rho_2}.$$

Оскільки в контрольованих тканинах, які мають різну поверхневу густину η , їхні пори та відстані між центрами ниток найчастіше різні (додаток А), то відповідно амплітуда ультразвукового імпульсного сигналу буде змінюватися.

На рис. 2.12 показана зміна амплітуд A_w у часі t , імпульсних ультразвукових сигналів при їх частоті заповнення 75 кГц, які пройшли крізь тканини з різними відстанями між центрами ниток, а на рис. 2.13 показано як змінюється амплітуда ультразвукової хвилі імпульсного сигналу, який пройшов крізь контрольовану тканину з поверхневою густиною $\eta = 408 \text{ г/м}^2$.

Для ультразвукового імпульсного сигналу при збільшенні його тривалості зменшується амплітудна та фазова похибки в порівнянні з безперервним сигналом. Тому необхідно вибирати тривалість ультразвукового імпульсного сигналу так, щоб не відбувалось перевідбивань

хвиль від поверхні тканини та поверхонь п'єзоперетворювачів, а амплітудна та фазова похибки наближались до найменших своїх значень.

Особливості розповсюдження ультразвукових коливань в тканинах пов'язані з різними розмірами пор та іншими їхніми структурними показниками. Це впливає на проходження хвиль, що може ускладнити визначення поверхневої густини η . Доведено, що згасанням ультразвукових коливань для більшості тканин можна знехтувати, а вибором співвідношення $\eta/(\rho_2\lambda_2)$, для ультразвукової хвилі в тканині (необхідним налаштуванням частоти f ультразвукових хвиль) можна збільшити амплітуду ультразвукових сигналів.

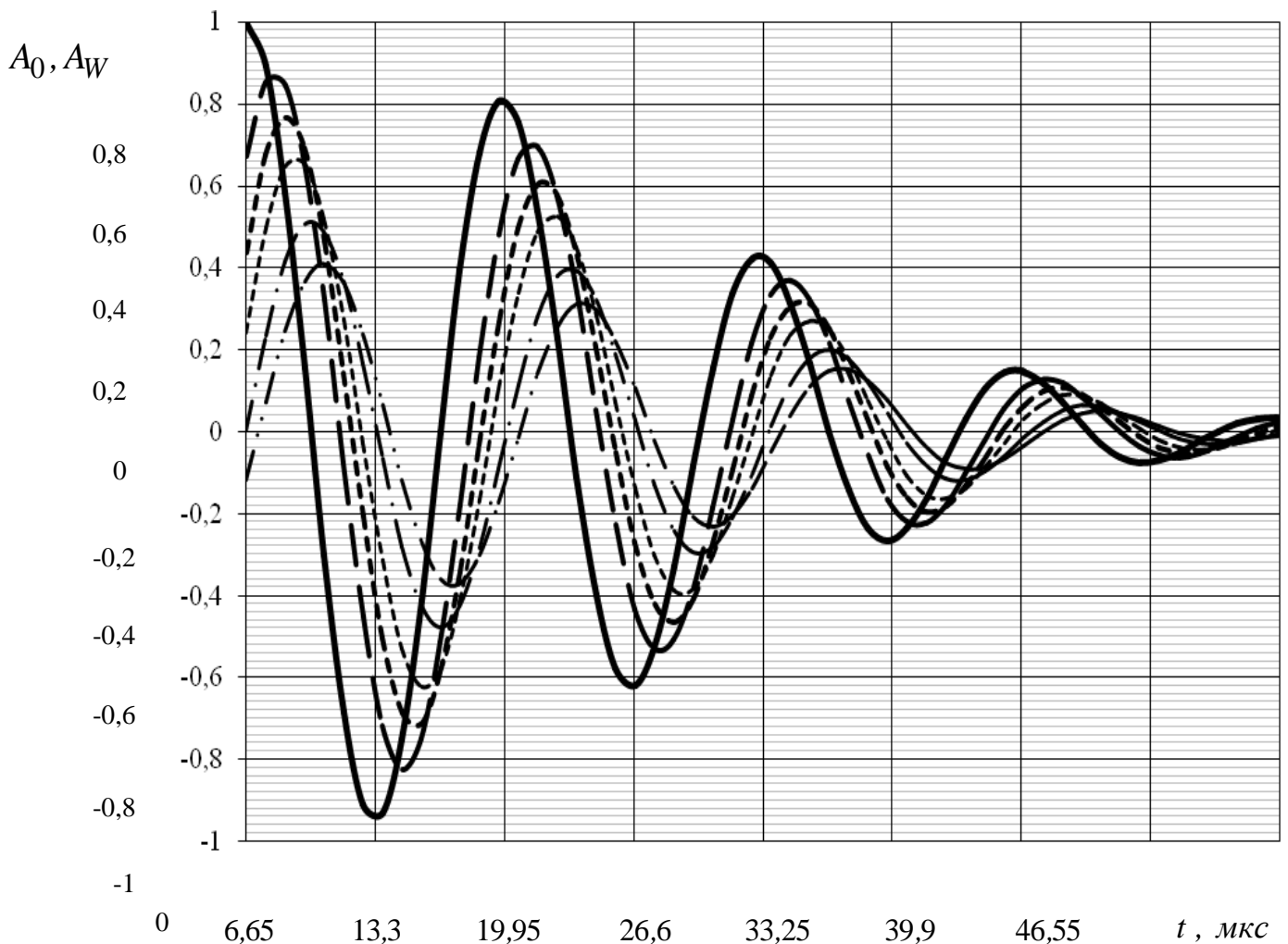


Рисунок 2.12 - Зміна амплітуд A_W ультразвукових хвиль, які пройшли крізь тканини, з показаною їхньою затримкою, та зміна амплітуди A_0 (—) падаючої хвилі за час t

— — — — —	- середня відстань між центрами ниток 0,60 мм;
- - - - -	- середня відстань між центрами ниток 0,52 мм;
- - - - -	- середня відстань між центрами ниток 0,47 мм;
- . - . - . -	- середня відстань між центрами ниток 0,39 мм;
- . . - . . - . .	- середня відстань між центрами ниток 0,35 мм

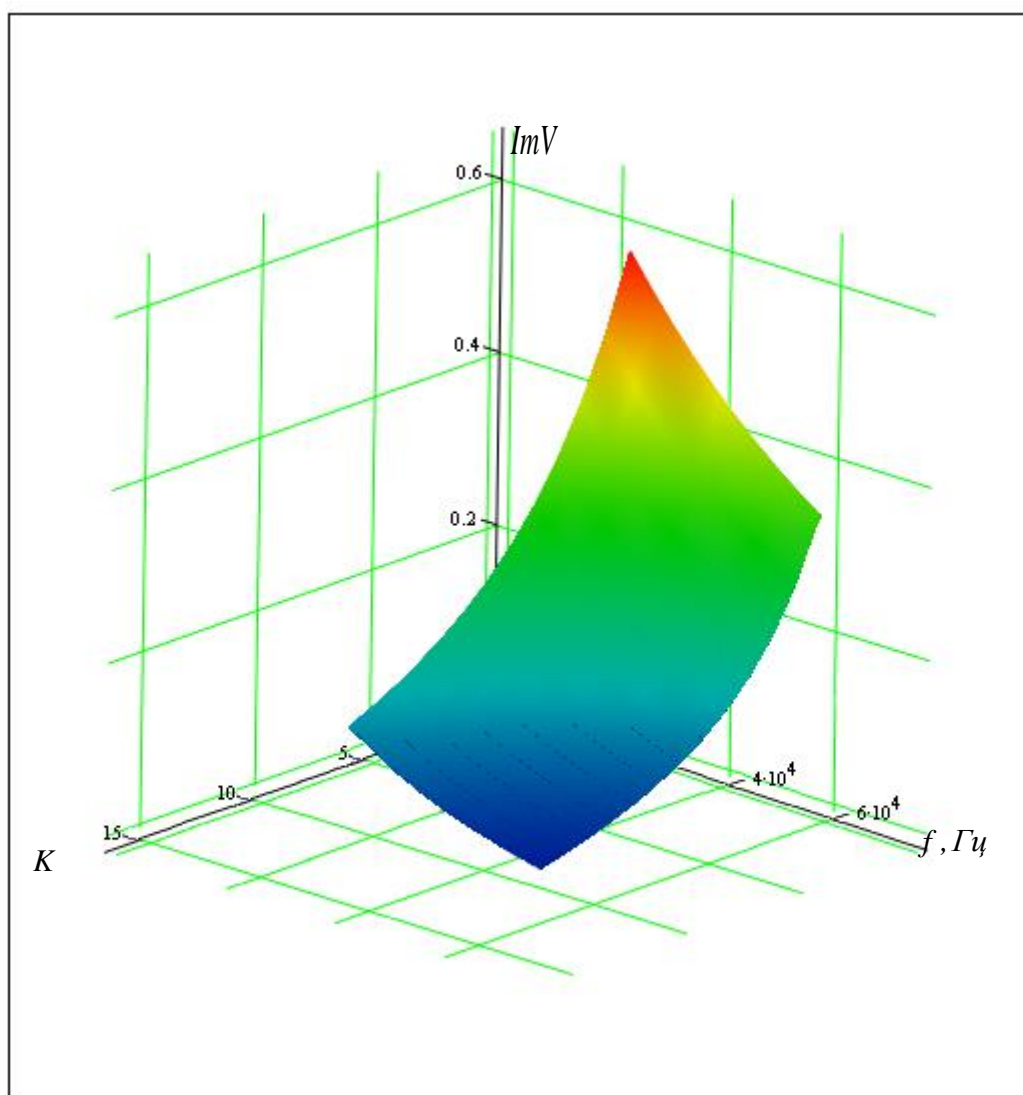


Рисунок 2.13 - Поверхня, яка демонструє вплив частоти f та зміни розмірів пор, які представлені коефіцієнтом K , на амплітуду ультразвукової хвилі, що пройшла крізь контрольовану тканину з поверхневою густиною $\eta = 408 \text{ г/м}^2$, при цьому амплітуда представлена модулем $|W|$

Отже, за отриманими виразами для імпульсного сигналу можна визначати його оптимальні параметри для контролю поверхневої густини η різних тканин. Основними параметрами, які потрібно налаштовувати для дослідження тканин за допомогою амплітудного методу, є тривалість та частота імпульсного ультразвукового сигналу. Отриманий вираз (2.72) дає можливість визначити тривалість імпульсного ультразвукового сигналу із амплітудою, що не змінюється протягом необхідного часу, та дозволяє описати проходження хвиль крізь різні тканини. Налаштування тривалості імпульсного ультразвукового сигналу з найменшою амплітудною похибкою без перевідбиттів складових імпульсу дає можливість описувати зміну амплітуд хвиль, що взаємодіють з тканинами, за допомогою отриманих виразів (2.41) та (2.48). При цьому тканини можуть бути з різними наскрізними порами та з різними відстанями між нитками (додаток Б). За допомогою виразів (2.41) та (2.48), знаючи, що згасанням в тканинах можна знехтувати, без необхідності у визначенні акустичного опору тканини Z_2 , також можна контролювати поверхневу густину η тканин з різним волокнистим складом.

2.4. Визначення зміни пористості тканини за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі

Оскільки зміна пористості тканини безпосередньо впливає на визначення поверхневої густини η тканин, то постає необхідність у її контролі. Загальна пористість тканини – це різниця між загальним об’ємом тканини та об’ємним заповненням цієї тканини речовиною волокна. Паро- та повітропроникність, гігроскопічність та гідрофобність, а також частково теплозахисні властивості тканин, в основному визначають за розміром і формою пор. Пористість необхідно також враховувати при проектуванні та створенні тканин різного призначення [62, 63].

Для визначення зміни пористості тканини необхідно використовувати ультразвуковий сигнал, що відбився від неї, оскільки ультразвуковий сигнал,

який пройшов крізь нитки та пори тканини, важко застосовувати для контролю. В ультразвуковій хвилі, яка пройшла крізь контрольовану тканину, міститься інформація сумарного впливу поверхневої густини η та пористості на амплітуду коливання, враховуючи принцип суперпозиції [57]. Тому доцільно використовувати для контролю амплітуду відбитої хвилі. За зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі відносно амплітуди хвилі, яка відбилася від еталонної тканини, пористість якої визначалась раніше, можна визначати зміну пористості контрольованої тканини [61]. Отже, відбита ультразвукова хвиля містить інформацію про те, як змінюються середні відстані між центрами ниток без значних деформацій, та як змінюються розміри пор контрольованої тканини.

Амплітуду ультразвукової хвилі, яка падає нормально на тканину та відбивається, знаючи, що відношення акустичних опорів повітря та тканини $Z_1 / Z_2 \ll 1$, можна представити у вигляді модуля $|V|$ комплексного коефіцієнта відбиття. Модуль показаний залежністю (2.43) та пов'язаний безпосередньо з діаметрами ниток, а якщо зважати на те, що для тканин величина $[(2\pi f / c_2) + \alpha](\pi d_{oy} / 4) \cos \nu \ll 1$, тоді цей вираз можна подати так:

$$|V| = \sqrt{1 - \frac{1 + \alpha \frac{Z_2}{Z_1} \frac{\pi d_{oy}}{4} \cos \nu}{\left(1 + \alpha \frac{Z_2}{2Z_1} \frac{\pi d_{oy}}{4} \cos \nu\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c_2} \frac{Z_2}{2Z_1} \frac{\pi d_{oy}}{4} \cos \nu\right)^2}}. \quad (2.74)$$

Якщо згасання в контрольованій тканині $|\delta_{|V|}| < 2\%$, то їм можна знехтувати ($\alpha \approx 0$), тоді залежність (2.74) можна показати як:

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\rho_1\lambda_1}{\pi^2\rho_2 d_{oy} \cos \nu}\right)^2}}, \quad (2.75)$$

де λ_1 – довжина ультразвукової хвилі в повітрі.

Таким чином, при зменшенні пористості тканини, амплітуда відбитої ультразвукової хвилі збільшується і навпаки. Цю залежність можна подати так:

$$\frac{|V|}{|V_0|} \approx \frac{Q_0}{Q}, \quad (2.76)$$

де $|V_0|$ – модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукової хвилі від еталонної тканини з відомою пористістю;

Q_0, Q – відома пористість та пористість тканини, що контролюється.

Вираз (2.76), з врахуванням коефіцієнтів, що характеризують тільки часткове надходження відбитих ультразвукових сигналів до приймача коливань [66], можна подати у наступному вигляді:

$$\frac{|V| K_\rho}{|V_0| K_{\rho 0}} = \frac{Q_0}{Q}, \quad (2.77)$$

де $K_{\rho 0}, K_\rho$ – коефіцієнти еталонної та контрольованої тканин, що характеризують

надходження відбитого ультразвукового сигналу до приймача коливань.

В процесі контролю вимірюються амплітуди відбитих ультразвукових коливань від еталонної та контрольованої тканин, які пропорційні величинам $|V_0| K_{\rho 0}$ та $|V| K_\rho$. Якщо величина $d_{oy} \cos \nu$ майже однакова (розбіжність складає менше 5 %) як для еталонної, так і для контрольованої тканин, та, якщо підставити залежність (2.75) у (2.77), то можна представити відношення модулів коефіцієнтів відбиття ультразвукових коливань в наступному вигляді:

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{4 Z_1}{\pi^2 f \rho_0 d_{oy} \cos \nu} \right)^2}{1 + \left(\frac{4 Z_1}{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu} \right)^2}}, \quad (2.78)$$

де ρ_0 – об'ємна густина еталонної тканини.

Після деяких перетворень вираз (2.78) можна подати як:

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \sqrt{\frac{\rho_2^2 \cdot (\pi^2 f \rho_0 d_{oy} \cos \nu)^2 + (4Z_1)^2}{\rho_0^2 \cdot (\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu)^2 + (4Z_1)^2}}. \quad (2.79)$$

Відношення пористості Q_0 еталонної тканини до пористості Q контрольованої тканини, підставивши залежність (2.79) у (2.76), можна представити ще у вигляді:

$$\frac{Q_0}{Q} = \frac{K_\rho}{K_{\rho 0}} \cdot \sqrt{\frac{(\pi^2 f d_{oy} \cos \nu)^2 + \left(\frac{4Z_1}{\rho_0}\right)^2}{(\pi^2 f d_{oy} \cos \nu)^2 + \left(\frac{4Z_1}{\rho_2}\right)^2}}. \quad (2.80)$$

При контролі тканин з малою поверхневою густиною ($\eta < 110 \text{ г/м}^2$), коли середні відстані між центрами ниток складають більше 0,6 мм, $\cos \nu \rightarrow 0$, а $d_{oy} \cos \nu < 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$, то виконуються нерівності $(\pi^2 f d_{oy} \cos \nu)^2 \ll \left(\frac{4Z_1}{\rho_0}\right)^2$;

$(\pi^2 f d_{oy} \cos \nu)^2 \ll \left(\frac{4Z_1}{\rho_2}\right)^2$, і залежність (2.80) можна подати як:

$$\frac{Q_0}{Q} = \frac{K_\rho}{K_{\rho 0}} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_0}, \quad (2.81)$$

де $\rho_2 / \rho_0 = |V| / |V_0|$.

Для більшості тканин має місце умова $K_\rho / K_{\rho 0} \approx 1$. Тоді зміну δ_Q пористості контрольованої тканини відносно еталонної тканини, можна визначити, враховуючи (2.81), так:

$$\delta_Q = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_2}\right) = \left(1 - \frac{|V_0|}{|V|}\right). \quad (2.82)$$

Відносну зміну δ_Q пористості контрольованої тканини у відсотках для загального випадку можна подати в наступному вигляді:

$$\delta_Q = \left(\frac{Q_0 - \frac{Q_0 |V_0| K_{\rho 0}}{|V| K_{\rho}}}{Q_0} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{|V_0| K_{\rho 0}}{|V| K_{\rho}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.83)$$

а абсолютну зміну Δ_Q можна подати так:

$$\Delta_Q = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{|V_0| K_{\rho 0}}{|V| K_{\rho}} \right). \quad (2.84)$$

З виразів (2.83) та (2.84) видно, що зміна пористості контрольованої тканини відносно еталонної тканини визначається за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі.

Можливо також визначати пористість шляхом знаходження об'єму, який займає повітря в порах зразку тканини, скануванням його з обох сторін та виконанням мікрорізів з наступним багаторазовим збільшенням в масштабі та обробкою отриманих даних. Однак, знаходження зміни пористості в абсолютних величинах безконтактно за допомогою відбитих ультразвукових хвиль для будь-якої контрольованої тканини, при цьому не пошкоджуючи її, має низку переваг при безпосередньому контролі тканин в процесі виробництва, одна з яких - забезпечення суцільного, а не вибіркового контролю.

Таким чином, показано, що ультразвуковий безконтактний метод можна застосовувати для контролю пористості Q тканини, не руйнуючи при цьому цілісність її полотна і не проводячи складних досліджень із мікрорізами та скануванням. Це дає можливість вести безперервний оперативний технологічний контроль поверхневої густини η різних тканин, яка безпосередньо пов'язана з пористістю Q , і яку можна буде визначати за допомогою адаптивних ультразвукових пристроїв, що будуть налаштовуватись на пористість саме контрольованих тканин.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розглянуто особливості розповсюдження ультразвукових хвиль в тканинах, які пов'язані з розмірами пор та іншими структурними показниками тканин, що можуть впливати на проходження ультразвукових хвиль.

2. Проведено дослідження проходження ультразвукового сигналу крізь контрольовані тканини з різними розмірами пор і відбиття від них та отримано залежності для можливості розрахунку та аналізу взаємодії ультразвукових хвиль з нитками тканин з різними акустичними опорами.

3. Отримано залежності, які пов'язують амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль як із зміною самих діаметрів ниток основи d_o та утку d_y (при однакових середніх відстанях між їхніми центрами для різних тканин), так і безпосередньо з поверхневою густиною η тканини.

4. Доведено, що згасанням ультразвукових коливань для більшості тканин можна знехтувати, а вибором співвідношення $\eta/(\rho_2\lambda_2)$, де ρ_2 – об'ємна густина тканини; λ_2 – довжина ультразвукової хвилі в тканині (необхідним налаштуванням частоти f ультразвукових хвиль) можна знизити вплив згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль.

5. Доведено, що при досить малому згасанні ультразвукового сигналу ($|\delta_{|w|}| < 2\%$ та $|\delta_{|v|}| < 2\%$) $\alpha \approx 0$, коли відношення акустичних опорів повітря та тканини $Z_1/Z_2 \ll 1$, залежності для амплітуд хвиль, які пройшли крізь контрольовану тканину, та для хвиль, що відбилися від неї, спрощуються без необхідності у визначенні акустичного опору тканини.

6. Доведено, що для визначення зміни пористості Q контрольованої тканини можна використовувати зміну значення амплітуди $|V|/K_p$ відбитої від неї ультразвукової хвилі в порівнянні з еталонною тканиною, що дає можливість визначати поверхневу густина η за допомогою значень амплітуди ультразвукової хвилі, яка пройшла крізь матеріал ниток.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ

При контролі поверхневої густини η тканини необхідно визначати зміну її пористості Q , що необхідно для контролю поверхневої густини η з виключенням впливу структурних показників, об'ємної густини ρ_2 та пористості Q різних контрольованих тканин на результати вимірювань. Це, в свою чергу, підвищить точність вимірювання та вірогідність контролю поверхневої густини η .

3.1. Розробка ультразвукового засобу контролю поверхневої густини

Розроблений ультразвуковий метод контролю поверхневої густини тканин полягає в зондуванні контрольованої тканини ультразвуковими хвилями з подальшим опрацювання амплітуд ультразвукових хвиль, які пройшли скрізь контрольовану тканину, та відбилися від неї.

На рис. 3.1 представлена розроблена структурна схема пристрою, що реалізує зазначений метод [67], за допомогою якого можна вимірювати поверхневу густину η тканини.

Пристрій містить генератор електричних коливань стабільної частоти 1, генератор прямокутних імпульсів 2, формувач зондуючих імпульсів 3, підсилювачі 4, 12 та 15, п'єзоперетворювач 5 з випромінювачем 7 та приймачем 6 ультразвукових хвиль, атенюатор 8, пікові детектори 9, 13 та 16, вольтметри 10, 14 та 17, приймаючий п'єзоперетворювач 11, контрольована тканина 18.

Пристрій працює наступним чином. Електричні коливання з виходу генератора 1 перетворюються за допомогою генератора прямокутних імпульсів 2 та формувача 3 у зондуючі імпульси, які підсилюються підсилювачем 4 за потужністю і поступають на випромінювач 7

п'єзоперетворювача 5. Контрольовану тканину 18 вводять між випромінювачем 7 п'єзоперетворювача 5 та приймаючим п'єзоперетворювачем 11 вимірювального ультразвукового каналу. Ультразвукові коливання, що випромінюються випромінювачем 7 п'єзоперетворювача 5, потрапляють до приймаючого п'єзоперетворювача 11 після проходження ними контрольованої тканини 18. Коли загасання в матеріалі незначне ($|\delta_{|w|}| < 2\%$) і ним можна знехтувати, амплітуда A_0 ультразвукових хвиль, що падають, пов'язана з амплітудою A_1 ультразвукових хвиль, які пройшли повітряні проміжки та контрольовану тканину 18, наступною залежністю:

$$A_1 = \frac{2 A_0}{\sqrt{\left(2 \cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2 c_2}\right)^2 + \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2 c_2}\right)^2}}, \quad (3.1)$$

Електричні коливання, які утворилися за допомогою приймаючого п'єзоперетворювача 11, після підсилення їх підсилювачем 12, подаються до пікового детектора 13, де перетворюються у постійну напругу U_1 , яка подається до вольтметра 14, за допомогою якого визначається постійна напруга U_1 , яка пропорційна модулю коефіцієнта проходження $|W|$ ультразвукових коливань скрізь контрольовану тканину 18.

Модуль коефіцієнту проходження $|W|$ ультразвукових коливань або відношення амплітуд ультразвукових коливань, що приймаються та випромінюються, можна визначити як:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{\left(\cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2 c_2}\right)^2 + \left(\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2 c_2}\right)^2}}. \quad (3.2)$$

Тоді напругу U_1 , враховуючи коефіцієнти передачі різних ланок пристрою, можна представити у наступному вигляді:

$$U_1 = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1}\right)^2}} U_m, \quad (3.3)$$

де U_m – амплітуда збуджуючих електричних коливань;

K_1 – коефіцієнт перетворення електричних коливань в зондувальні імпульси;

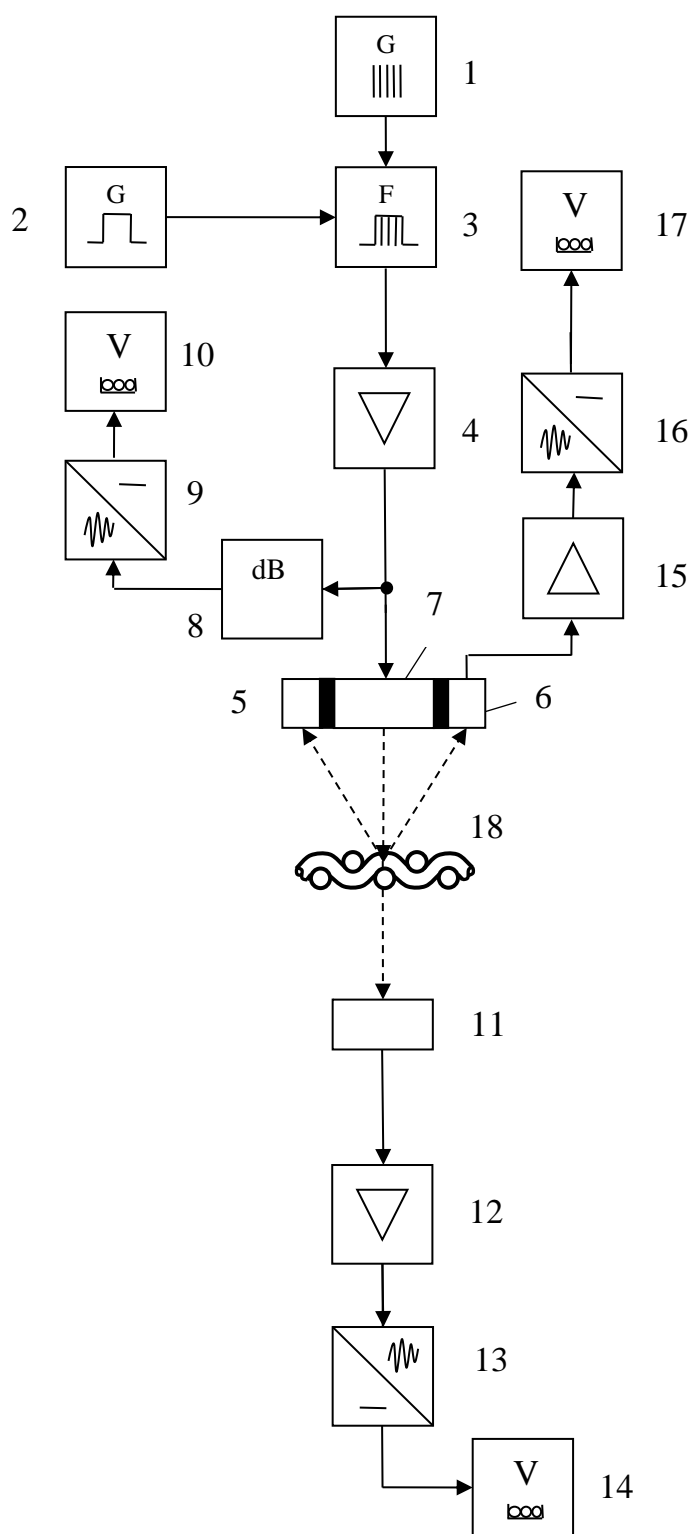


Рисунок 3.1 - Структурна схема пристрою контролю поверхневої густини η тканин

K_2 — коефіцієнт підсилення підсилювача 4;

K_3 — коефіцієнт перетворення блоків 7 та 11;

K_4 — коефіцієнт підсилення підсилювача 12;

K_5 — коефіцієнт перетворення пікового детектора 13.

Зондувальні імпульси, після підсилення їх підсилювачем 4, також подаються на вхід атенюатора 8, за допомогою якого послаблюються та подаються на вхід пікового детектора 9, де перетворюються в постійну напругу U_0 , яка подається на вольтметр 10. За допомогою вольтметра 10 визначається постійна напруга U_0 , амплітуда якої пропорційна амплітуді A_0 ультразвукових коливань, що випромінюються випромінювачем 7 п'єзоперетворювача 5. Напругу U_0 , яка вимірюється вольтметром 10, можливо подати як:

$$U_0 = K_1 K_2 K_6 K_7 U_m, \quad (3.4)$$

де K_6 — коефіцієнт ослаблення атенюатора 8;

K_7 — коефіцієнт перетворення пікового детектора 9.

Ультразвукові коливання, які відбиваються від контрольованої тканини 18 потрапляють на приймач 6 п'єзоперетворювача 5, де перетворюються в електричні коливання, з виходу приймача 6 підсилюються підсилювачем 15 за потужністю та потрапляють до пікового детектора 16, де перетворюються у постійну напругу U_2 , яка фіксується та потрапляє до вольтметра 17. Амплітуда цієї напруги пропорційна добутку модулю коефіцієнта відбиття $|V|$ ультразвукових коливань, який можна описати виразом (2.48), та коефіцієнта K_p , який характеризує залежність амплітуди відбитих ультразвукових коливань до приймача 6 п'єзоперетворювача 5 від структурних показників контрольованої тканини 18 та її положення. Напругу U_2 можна визначити як:

$$U_2 = K_1 K_2 K_8 K_9 K_{10} \frac{K_\rho}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K \eta f \cos \nu} \right)^2}} U_m, \quad (3.5)$$

де K_8 – коефіцієнт перетворення блоків 7 та 6;

K_9 – коефіцієнт підсилення підсилювача 15;

K_{10} – коефіцієнт перетворення пікового детектора 16.

З виразів (2.41) та (2.48) можна визначити поверхневу густину η контрольованої тканини 18, а використовувати наведені вирази можна в залежності від параметрів хвиль, які вимірюються з більшою точністю:

$$\eta = \frac{Z_1 \sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1}}{K f \cos \nu} = Z_1 \left(\sqrt{\frac{1}{|V|^2} - 1} K f \cos \nu \right)^{-1}. \quad (3.6)$$

З виразу (3.6) видно, що для визначення поверхневої густини η не потрібно знати об'ємну густину ρ_2 контрольованої тканини 18. Виключити вплив зміни структурних показників та пористості Q можна, забезпечивши контроль зміни величини коефіцієнту K (відносно еталонної тканини), який в основному змінюється із зменшенням або збільшенням пор між нитками контрольованої тканини 18. Цю зміну можна визначити за зміною ультразвукового сигналу, який відбивається від контрольованої тканини 18 та потрапляє на приймач 6 п'єзоперетворювача 5, відносно ультразвукового сигналу, який відбився від еталонної тканини та потрапив на приймач 6 п'єзоперетворювача 5 раніше. Визначити зміну значення коефіцієнту K контрольованої тканини 18 можна за зміною величини постійної напруги U_2 , яка відображається на індикаторі вольтметра 17, відносно постійної напруги U_2^* , яка була показана вольтметром 17 при контролі еталонної тканини. Знаючи, що пористість Q безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом K , вираз (3.2) з попереднього проведеного аналізу можна подати як:

$$\frac{|V| K_\rho}{|V_0| K_{\rho 0}} = \frac{Q_0}{Q} = \frac{K}{K_0}, \quad (3.7)$$

де K_0 – коефіцієнт еталонної тканини, який враховує відстані та об'єм повітря

між нитками основи, утоку та їх деформацію в переплетінні між собою.

Враховуючи вираз (3.7), можна визначити значення коефіцієнту K контрольованої тканини 18, пов'язавши його з напругами U_2 та U_2^* наступною залежністю:

$$K = \frac{|V| K_{\rho}}{|V_0| K_{\rho 0}} \cdot K_0 = \frac{U_2}{U_2^*} \cdot K_0. \quad (3.8)$$

Значення коефіцієнту K_0 еталонної тканини визначається один раз. За напругами, які пропорційні ультразвуковим сигналам, що взаємодіють з контрольованою та еталонною тканинами, з урахуванням зміни коефіцієнту K та при $Z_1 / (f \cos \nu) = \text{const}$, зробивши підстановку виразів (3.3), (2.8) в (3.6) та після деяких перетворень, можна визначити поверхневу густину η як:

$$\eta = \frac{Z_1 |V_0| K_{\rho 0} \sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1}}{K_0 |V| K_{\rho} f \cos \nu} = \frac{Z_1 U_2^* \sqrt{\left(\frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 U_m}{U_1} \right)^2 - 1}}{K_0 U_2 f \cos \nu}. \quad (3.9)$$

При проведенні налаштуванні атенюатора 8 перед початком вимірювань та при відсутності контрольованої тканини 18 у вимірювальному каналі, співвідношення коефіцієнтів дорівнює 1 $((K_3 K_4 K_5) / (K_6 K_7) = 1)$ та співвідношення напруг також дорівнює 1 $(U_1 / U_0 = 1)$.

Після налаштування пристрою, зробивши деякі зміни у виразі (3.9), можна визначити поверхневу густину η як:

$$\eta = \frac{Z_1 U_2^* \sqrt{\left(\frac{K_6 K_7 U_0}{K_3 K_4 K_5 U_1} \right)^2 - 1}}{K_0 U_2 f \cos \nu} = \frac{Z_1 U_2^* \sqrt{\left(\frac{U_0}{U_1} \right)^2 - 1}}{K_0 U_2 f \cos \nu}. \quad (3.10)$$

Таким чином, знаючи значення коефіцієнту K_0 , добуток частоти f та $\cos \nu$, швидкість розповсюдження ультразвукових коливань в повітрі c_1 , значення об'ємної густини повітря ρ_1 , з виразу (3.10) можна визначити поверхневу густину η . При цьому виключається вплив структурних

показників, об'ємної густини ρ_2 та пористості Q контрольованої тканини 18 на результати вимірювань.

3.2. Визначення чутливості зміни амплітуди ультразвукової хвилі до зміни поверхневої густини тканини

Для визначення поверхневої густини η в діапазоні, який охоплює більшість тканин, необхідно визначити найбільшу чутливість зміни амплітуди ультразвукової хвилі до зміни поверхневої густини тканин..

Контроль різних тканин буде проводитися за рахунок безконтактного випромінювання та прийому ультразвукових хвиль.

Для визначення чутливості зміни амплітуди ультразвукової хвилі необхідно проаналізувати залежність коефіцієнта поглинання хвилі w від параметру $\eta/(\rho_2\lambda_2)$. Сам коефіцієнт поглинання w можна подати наступним виразом:

$$w = \frac{A_0}{A_1} = \frac{1}{|W|} = \sqrt{\left(\cos \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2}\right)^2 + \left(\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \sin \frac{\pi^2 f d_{oy} \cos \nu}{2c_2}\right)^2},$$

або

$$w = \frac{1}{|W|} = \sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_2} \left(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2}\right)\right)^2} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1}\right)^2}. \quad (3.11)$$

Залежності коефіцієнту поглинання w від параметру $\eta/(\rho_2\lambda_2)$ для різних тканин наведені на рис. 3.2. Ці залежності дають можливість визначити оптимальну частоту f зондувальних ультразвукових хвиль для діапазону контрольованих величин поверхневої густини η . При правильному налаштуванні частоти f можна збільшити чутливість зміни амплітуди хвилі до зміни поверхневої густини η для більшості тканин.

Підставляючи вираз (3.6) в (3.11), можливо подати чутливість ν в наступному вигляді:

$$\nu = \frac{K f \cos \nu}{Z_1 |W| \sqrt{\frac{1}{|W|^2} - 1}} = \frac{K f \cos \nu}{Z_1 \sqrt{1 - |W|^2}}, \quad (3.13)$$

а якщо прийняти до уваги вираз (3.2) то вираз (3.13) можна записати як:

$$\nu = \frac{K f \cos \nu}{Z_1 |V|}. \quad (3.14)$$

Для того, щоб провести аналіз чутливості зміни амплітуди ультразвукової хвилі, потрібно провести дослідження тканин із різними відстанями між нитками та із різними пористостями. Чутливість зміни амплітуди ультразвукової хвилі, як показав проведений аналіз, буде залежати, в основному, від зміни розмірів наскрізних пор контрольованих тканин та від зміни самої частоти f зондувальних ультразвукових хвиль.

Проаналізувати амплітудне співвідношення ультразвукових хвиль, що пройшли крізь тканину, та хвиль, які падають на неї, можливо за допомогою співвідношення виміряних амплітуд напруги. В табл. 3.1 подані як розраховані, так і експериментальні дані для деяких вибраних зразків контрольованих тканин, а в табл. 3.2 показано, як кількісно змінюється чутливість зміни амплітуди ультразвукових хвиль до зміни самої поверхневої густини η .

Як видно з табл. 3.1, для тканин з різною пористістю змінюються похибки, які пов'язані з різницею між амплітудним співвідношенням ультразвукових хвиль, отриманого розрахунком, та співвідношенням, яке визначене за вимірними напругами.

З табл. 3.2 видно, що із зменшенням загального об'єму пор у два рази в контрольованій тканині, чутливість ν може збільшитися більше ніж у двічі, а

при збільшенні тільки поверхневої густини η , чутливість ν може зменшуватись.

Таблиця 3.1 - Показники амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що взаємодіють з контрольованими тканинами

№ з/п	Тканина арт. №	Поверхнева густина η $г/м^2$	$\frac{K}{K_0}$	Знач. віднош. вимір. напруг. U_1/U_0	Розр. знач. $ W $	Знач. віднош. вимір. напруг. U_0/U_1	Розр. знач. w	Відносна похибка $\left \frac{\delta W }{ W } \right = \left \frac{U_0 \left(W - \frac{U_1}{U_0} \right)}{U_1} \right \times 100 \%$	Відносна похибка $\left \frac{\delta w}{w} \right = \left \frac{U_1 \left(w - \frac{U_0}{U_1} \right)}{U_0} \right \times 100 \%$
1.	1В1928/180	113,2	1	0,857	0,840	1,167	1,190	2,01	2,01
2.	1В1928/401	113,4	1	0,856	0,840	1,168	1,190	1,85	1,84
3.	8В0132/182	169,3	1,1	0,737	0,725	1,357	1,379	1,61	1,61
4.	8В0132/231	165,7	1,15	0,673	0,683	1,487	1,464	1,55	1,54
5.	5В0032/352	163,2	1,88	0,264	0,257	3,793	3,891	2,51	2,57
6.	5В0032/424	160,0	1,79	0,270	0,275	3,705	3,636	1,88	1,86
7.	8В0153	407,6	1,4	0,275	0,280	3,637	3,571	1,83	1,81
8.	1В3181/342	237,0	2,55	0,277	0,283	3,609	3,534	2,14	2,08
9.	1В3181/435	238,0	2,5	0,281	0,287	3,557	3,484	2,10	2,07
10.	2В3109/321	264,1	3,9	0,166	0,170	6,036	5,882	2,62	2,56
11.	2В3109/322	258,3	4,2	0,158	0,162	6,336	6,173	2,65	2,58

Таблиця 3.2 - Чутливість зміни амплітуди ультразвукових хвиль, які пройшли крізь контрольовані тканини з різними розмірами пор, до зміни поверхневої густини η

№ з/п	Тканина арт. №	Поверхнева Густина η $г / м^2$	$\frac{K}{K_0}$	Знач. віднош. вимір. напруг. U_1 / U_0	Знач. віднош. вимір. напруг. U_0 / U_1	Чутливість ν до поверхн. густини η кожної тканини $\frac{1}{г / м^2}$	Середня чутливість $\bar{\nu}$ до поверхн. Густина η діапазону усіх тканин $\frac{1}{г / м^2}$
1.	1B1928/180	113,2	1	0,857	1,167	0,010	0,016
2.	1B1928/401	113,4	1	0,856	1,168	0,010	
3.	8B0132/182	169,3	1,1	0,737	1,357	0,008	
4.	8B0132/231	165,7	1,15	0,673	1,487	0,009	
5.	5B0032/352	163,2	1,88	0,264	3,793	0,023	
6.	5B0032/424	160,0	1,79	0,270	3,705	0,023	
7.	8B0153	407,6	1,4	0,275	3,637	0,009	
8.	1B3181/342	237,0	2,55	0,277	3,609	0,015	
9.	1B3181/435	238,0	2,5	0,281	3,557	0,015	
10.	2B3109/321	264,1	3,9	0,166	6,036	0,023	
11.	2B3109/322	258,3	4,2	0,158	6,336	0,025	

3.3. Експериментальна установка для вимірювання поверхневої густини тканин

На базі проведених досліджень були розроблені ультразвуковий безконтактний пристрій контролю поверхневої густини η тканин УКТП – 1 та експериментальна установка. Вимірювальні засоби установки підключаються до пристрою УКТП – 1 для розширення його можливостей. Пристрій реалізує амплітудний метод контролю поверхневої густини η , що дає можливість визначати її безконтактно безпосередньо у процесі виробництва тканини. Ультразвуковий пристрій контролю УКТП – 1 може працювати в автономному режимі та в режимі, який передбачає його підключення до експериментальної установки. Установка дає можливість регулювати тривалість та частоту пакетів імпульсів вимірювального сигналу пристрою. Структурна схема пристрою УКТП – 1 та експериментальної установки представлена на рис. 3.3.

Пристрій містить внутрішній генератор 1, тумблер 2, подільник частоти 3, формувач керуючих прямокутних імпульсів 4, формувач імпульсного сигналу 5, підсилювач 6, випромінюючий п'єзоперетворювач 7, приймаючий п'єзоперетворювач 8, регульований підсилювач 9, ключ 10, пікові детектори 11 та 14, блок ділення 12, атенюатор 13, регульований блок затримки 15, індикатор 16. В експериментальну установку, до якої може підключатися пристрій контролю поверхневої густини тканин, також входять генератори Г5 – 75, Г6 – 31, які позначені номерами 17, 18, осцилографи С1 – 55, С1 – 74, що позначені номерами 19, 20, та частотомір ЧЗ – 38, який позначений на схемі номером 21. Контрольована тканина позначена номером 22.

Пристрій працює наступним чином. З виходу генератора 1, при положенні тумблера 2 на позначці “внут.”, імпульси частоти f потрапляють на вхід формувача 5, який формує зондувальний імпульсний сигнал, при цьому ці імпульси також діляться по частоті, за допомогою подільника 3 і потрапляють на вхід формувача прямокутних імпульсів 4, який керує тривалістю зондувального імпульсного сигналу. Напряга з виходу формувача

5 подається на вхід підсилювача 6, де підсилюється за потужністю та потрапляє до входу випромінюючого п'єзоперетворювача 7. Випромінюючий п'єзоперетворювач 7, в свою чергу, починає випромінювати ультразвуковий імпульсний сигнал, який спочатку падає на контрольовану тканину 22, а потім проходить її та повітряні проміжки, а потім потрапляє до приймаючого п'єзоперетворювача 8, який перетворює прийнятий ультразвуковий сигнал знову в електричні коливання. Ці коливання підсилюються регульованим підсилювачем 9, а потім потрапляють до пікового детектора 11, після спрацювання ключа 10 з затримкою τ , яка задається регульованим блоком затримки 15, для виділення корисного вимірювального сигналу. Сама затримка τ дорівнює $l_{\text{пер.}}/c_1$, де $l_{\text{пер.}}$ – відстань між випромінюючим 7 та приймаючим 8 п'єзоперетворювачами. За допомогою пікового детектора 11 отримується постійна напруга U_1 , яка потрапляє до одного входу блоку ділення 12, а на інший його вхід потрапляє напруга U_0 , що отримується за допомогою пікового детектора 14 після ослаблення електричних коливань, після проходження атенюатора 13, до якого вони потрапляють з виходу підсилювача 6. На виході блоку ділення 12 отримується постійна напруга $U_{\text{вих.}}$, яка пропорційна амплітудному співвідношенню ультразвукових хвиль, що падають на тканину, та хвиль, які проходять крізь неї. Ця напруга описується наступною залежністю:

$$U_{\text{вих.}} = U_{\text{он.}} \frac{U_0}{U_1} = U_{\text{он.}} K_4 \frac{K_5 K_6}{K_1 K_2 K_3} \sqrt{1 + \left(\frac{K \eta f \cos \nu}{Z_1} \right)^2}, \quad (3.15)$$

де $U_{\text{он.}}$ – амплітуда опорної напруги;

K_1 – коефіцієнт перетворення п'єзоперетворювачів 7, 8;

K_2 – коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 9;

K_3 – коефіцієнт перетворення пікового детектора 11;

K_4 – коефіцієнт перетворення блоку ділення 12;

K_5 – коефіцієнт перетворення атенюатора 13;

K_6 – коефіцієнт перетворення пікового детектора 14.

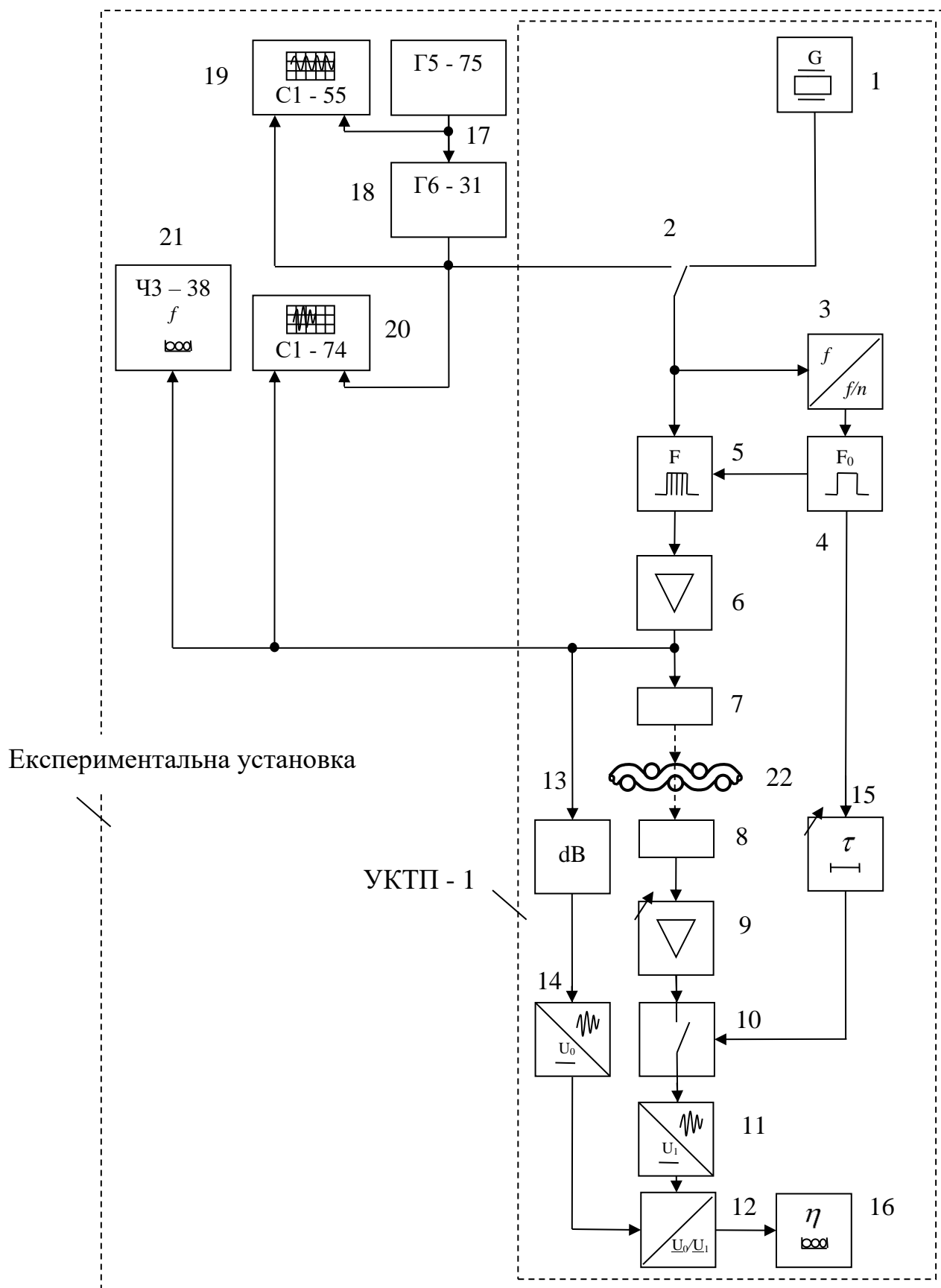


Рисунок 3.3 - Структурна схема пристрою УКТП – 1 та експериментальної установки для вимірювання поверхневої густини тканин

Виходячи з виразу (3.15), величину поверхневої густини η тканини 22, яка буде відображатися на індикаторі 16, можна подати наступним чином:

$$\eta = \frac{Z_1 \sqrt{\left(\frac{U_{\text{вих.}} K_1 K_2 K_3}{U_{\text{оп.}} K_4 K_5 K_6} \right)^2 - 1}}{K f \cos \nu}. \quad (3.16)$$

Перед початком вимірювань, коли у вимірювальному каналі відсутня контрольована тканина 22, пристрій налаштовується за допомогою регульованого підсилювача 9 так, щоб амплітудне співвідношення напруги дорівнювало $U_0/U_1=1$, а за допомогою блоку затримки 15 налаштовується тривалість затримки τ у відповідності до відстані $l_{\text{пер.}}$ між п'єзоперетворювачами 7 та 8.

Для розширення функціональних можливостей пристрою, яке полягає в можливості налаштування тривалості та частоти f пакетів імпульсів зондувального сигналу, використовуються два зовнішніх генератори 17, 18. Безперервний сигнал одного з генераторів запускається та переривається для отримання необхідної тривалості імпульсом іншого.

Частотоміром 21 можна контролювати частоту f заповнення зондувального сигналу, а за допомогою осцилографів 19 та 20 можна спостерігати та налаштовувати зондувальні сигнали візуально, так як показано на рис. 3.4. Регулювання частоти f імпульсів дає можливість як підвищувати чутливість ν ультразвукового пристрою до тканин з малою поверхневою густиною η , так і до тканин із більшою пористістю. Регулювання тривалості пакетів імпульсів може забезпечити зменшення амплітудної похибки вимірювання сигналу.

Перед вимірюваннями пристрій УКТП – 1 налаштовувався на зміну загальної пористості контрольованих тканин за допомогою амплітуди відбитих ультразвукових хвиль. Також пристроєм вимірювалися тканини як з малою поверхневою густиною $\eta < 100 \text{ г/м}^2$, так і тканини з $\eta > 400 \text{ г/м}^2$. Середні відстані між центрами ниток зазначених тканин відрізнялися між собою менше ніж в 2 рази.

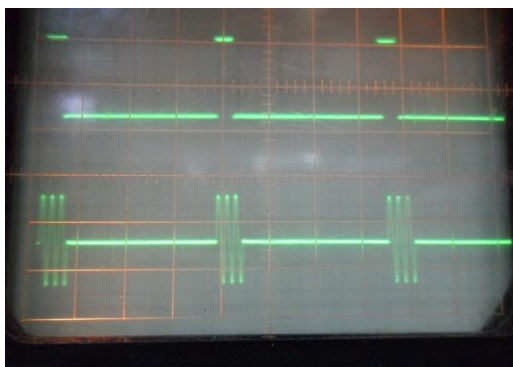
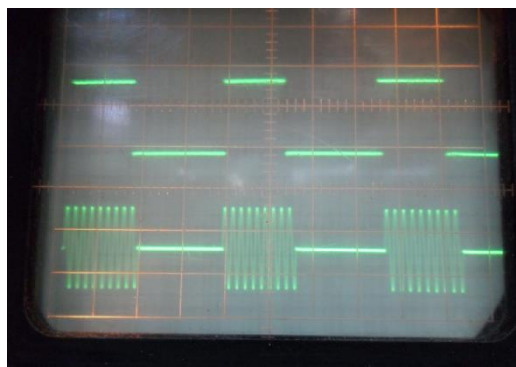
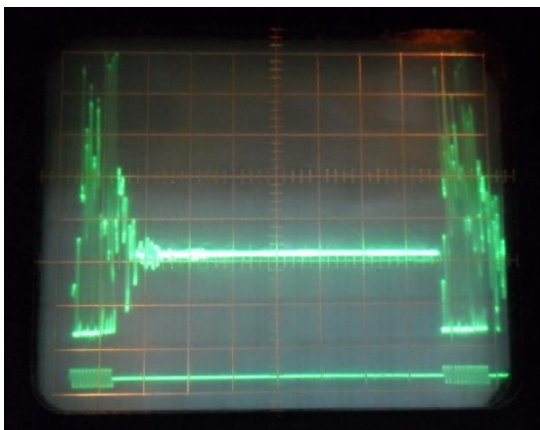
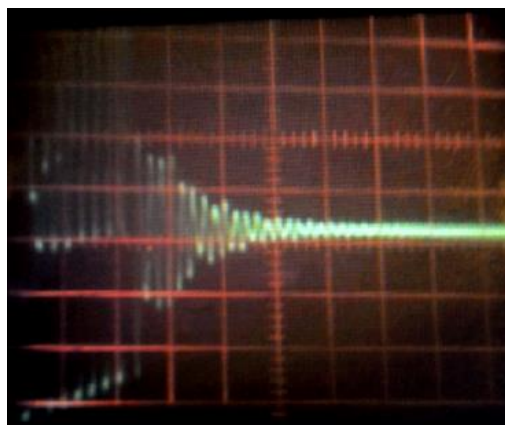
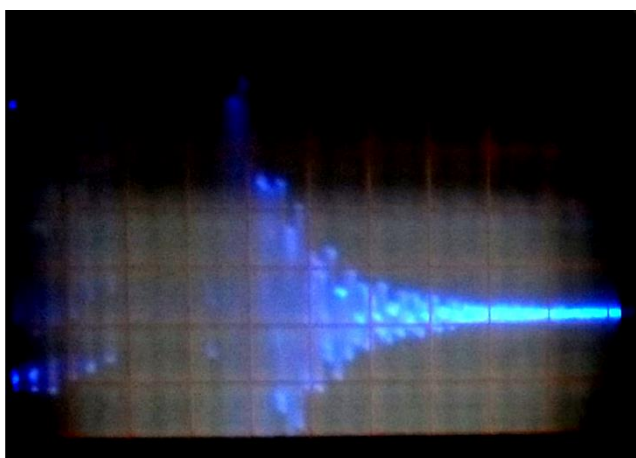
**а****б****в****г****д**

Рисунок 3.4 - Осцилограми вихідних сигналів генераторів:

а – мала тривалість пакетів імпульсів; б – середня тривалість пакетів імпульсів; в – імпульсний ультразвуковий сигнал, тривалість та частота якого налаштовується за пакетами імпульсів від зовнішніх генераторів; г – імпульсний ультразвуковий сигнал від внутрішнього генератора, який відображається на екрані осцилографа С1 – 55; д – імпульсний ультразвуковий сигнал, що відображається на екрані осцилографа С1 – 74

Якщо пристрій правильно налаштований, то $U_0/U_1=1$ (за відсутності тканини), а $(K_1 K_2 K_3)/(K_4 K_5 K_6)=1$, тоді похибку вимірювання можна визначити з врахуванням наведеного регулювання. Оскільки $Z_1 = \rho_1 c_1$, а ймовірнісні густини складових похибок, які спричиняються величинами, що входять у вираз (3.15) та (3.16), розподіляються за нормальним законом, то вираз для відносної похибки пристрою УКТП – 1 можна подати як:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{вих.}}{k_{вих.}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c_1}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \xi_f}{\xi_f}\right)^2}, \quad (3.17)$$

де $k_{вих.} = \sqrt{(U_{вих.}/U_{оп.})^2 - 1}$, а $\xi_f = K f \cos \nu$.

Як показали дослідження, складові загальної похибки не перевищують $(\Delta k_{вих.}/k_{вих.}) \cdot 100\% \leq 0,92\%$, $(\Delta \rho_1/\rho_1) \cdot 100\% \leq 1,18\%$, $(\Delta c_1/c_1) \cdot 100\% \leq 1,02\%$, $(\Delta \xi_f/\xi_f) \cdot 100\% \leq 1,04\%$, а сама загальна відносна похибка $\delta_{np} = (\Delta \eta/\eta) \cdot 100\% \leq 1,97\%$, фактично можна прийняти $\delta_{np} = (\Delta \eta/\eta) \cdot 100\% \leq 2\%$.

Значення поверхневої густини η зразків різних тканин, що визначались за допомогою вже відкаліброваного пристрою УКТП – 1, перевірялись за допомогою вагового методу та вірцевих електронних вагах. Зважування зразків з площею $S = 0,01 \text{ м}^2$ (однаковою для всіх зразків тканин) проводилися на електронних вагах ТВЕ – 021 з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta = 0,001 \text{ г}$. Абсолютна похибка вимірювання ваг перевірялась на всьому діапазоні мас зразків тканин, завдяки еталонним пластинкам та гирям з масами: 0,02 г; 0,05 г; 0,10 г; 0,20 г; 0,50 г; 1 г; 2 г. Як показали зважування, вимірювання були проведені із фактичною абсолютною похибкою $\Delta = 0,001 \text{ г}$, що дає можливість з високою точністю проводити визначення дійсного значення поверхневої густини η зразків тканин.

Порівняння вимірювань поверхневої густини η , які були отримані за допомогою розробленого безконтактного ультразвукового пристрою УКТП – 1, та тих, що були зроблені за допомогою вірцевих електронних ваг ТВЕ – 021, наведені в табл. 3.3. Характеристика вихідного сигналу ультразвукового безконтактного пристрою УКТП – 1 представлена на рис. 3.5 для діапазону

тканин з середніми відстанями між центрами ниток 0,6 мм. Характеристика пристрою наближається до лінійної залежності для вибраного діапазону вимірюваної величини. Загальний вигляд експериментальної установки, до якої входить сам пристрій, представлений на рис. 3.6,а. На рис. 3.6,б наведене безконтактне вимірювання поверхневої густини η тканини арт. № 1B1928/401 (з фактичною поверхневою густиною $\eta = 113,4 \text{ г/м}^2$). Порівняння безконтактного вимірювання поверхневої густини η тканини арт. № 1B1928/180 з її визначенням за допомогою вагового методу показане на рис. 3.7.

Зразок тканини арт. № 1B1928/180 опромінювався ультразвуковими хвилями з наступним вимірюванням поверхневої густини η за допомогою пристрою УКТП – 1. Після цього із досліджуваного зразку був вирізаний менший зразок тканини з площею $S = 0,01 \text{ м}^2$ для подальшого зважування. Після зважування зразка було отримане фактичне значення технологічного параметру досліджуваної тканини.

Були проведені також вимірювання у випадку, коли контрольована тканина розміщувалася під кутом до вісі п'єзоперетворювачів. Цей кут змінювався в межах від 0° до 10° , а додаткова похибка при цьому не перевищувала $\delta_{\varphi_\alpha} \leq 0,6\%$. Це дозволяє проводити контроль поверхневої густини η тканини при допустимому її провисанні безпосередньо в процесі виробництва.

При зміні температури навколишнього середовища в межах від 20°C до 40°C додаткова похибка, яка може виникати, не перевищувала $\delta_t \leq 0,8\%$.

При проведенні безконтактного контролю поверхневої густини η різних тканин досить важливим є правильність оцінки його вірогідності. Для того, щоб оцінити вірогідність контролю поверхневої густини η , необхідно спочатку оцінити її інструментальну та методичну складові. Саму вірогідність можна виразити наступним виразом:

Таблиця 3.3 - Порівняння вимірювання поверхневої густини за допомогою УКТП – 1 та визначення її величини з використанням вагового методу

№ виміру	Покази вимірювань УКТП-1 величини поверхневої густини η [г/м²] Тканина арт. №1В1928/180 (1)	Виміри маси m [г] зразку тканини арт. №1В1928/180 (1), які були зроб. за допомог. ваг ТВЕ – 021, що помножені на величину 100 [м⁻²]	Покази вимірювань УКТП-1 величини поверхневої густини η [г/м²] Тканина арт. №1В1928/401 (2)	Виміри маси m [г] зразку тканини арт. №1В1928/401 (2), які були зроб. за допомог. ваг ТВЕ – 021, що помножені на величину 100 [м⁻²]	
1.	113	113,0	113	113,6	
2.	114	113,1	114	113,4	
3.	115	113,2	113	113,2	
4.	116	113,3	115	113,3	
5.	116	113,4	116	113,5	
6.	113	113,1	116	113,4	
7.	115	113,2	116	113,4	
8.	116	113,3	116	113,3	
9.	115	113,2	115	113,3	
10.	116	113,2	116	113,6	
Середні значення $\bar{\eta}$ та \bar{m}	114,90	113,2	115	113,4	
Показники відхилень вимірювань					
Середньо- квадратичне відхилення σ_1 , г/м²	Відносна похибка δ_{n1} , %	Абсолютна похибка Δ_{n1} , г/м²	Середньо- квадратичне відхилення σ_2 , г/м²	Відносна похибка δ_{n2} , %	Абсолютна похибка Δ_{n2} , г/м²
1,14	1,50	1,70	1,18	1,41	1,60

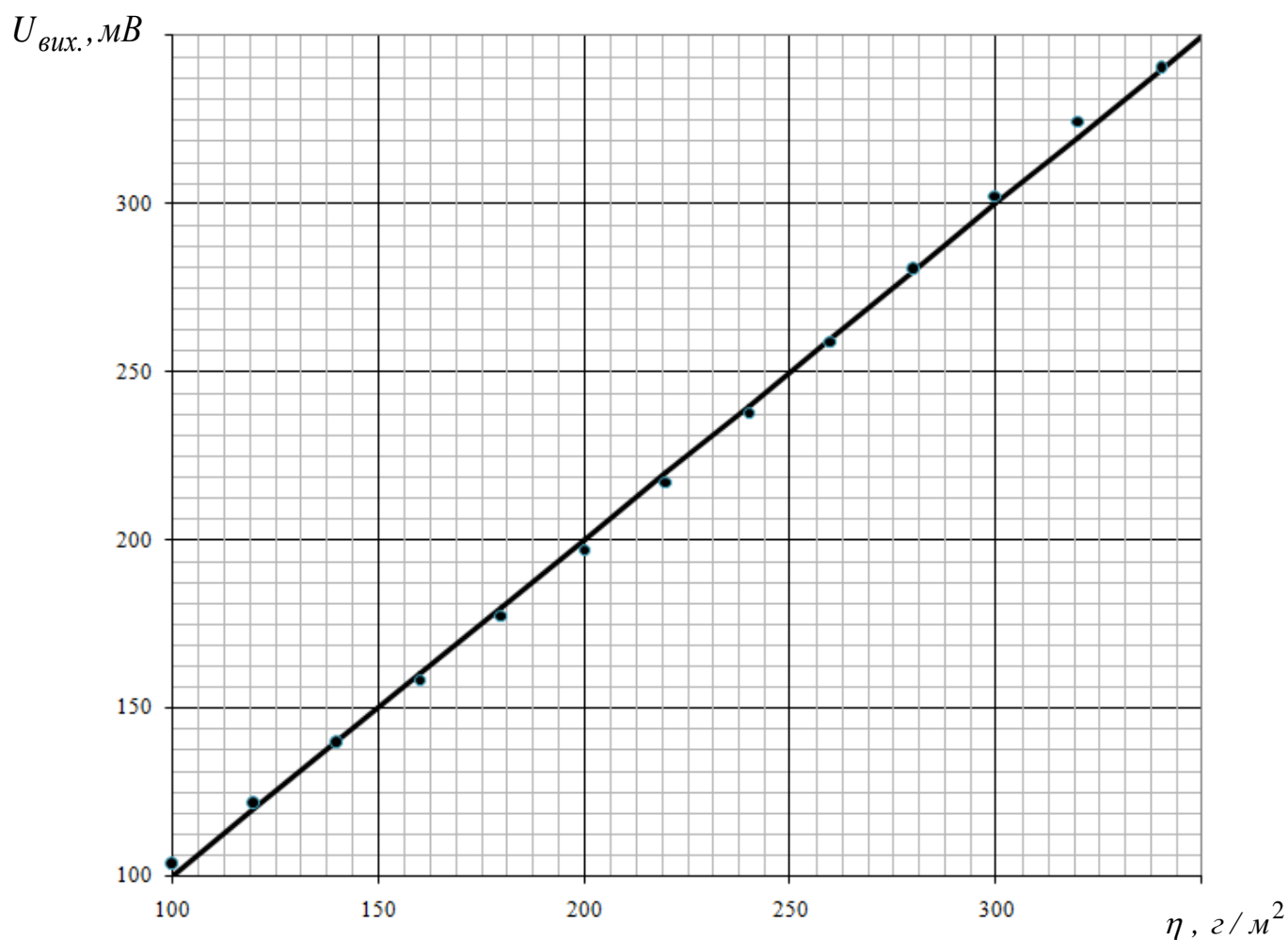
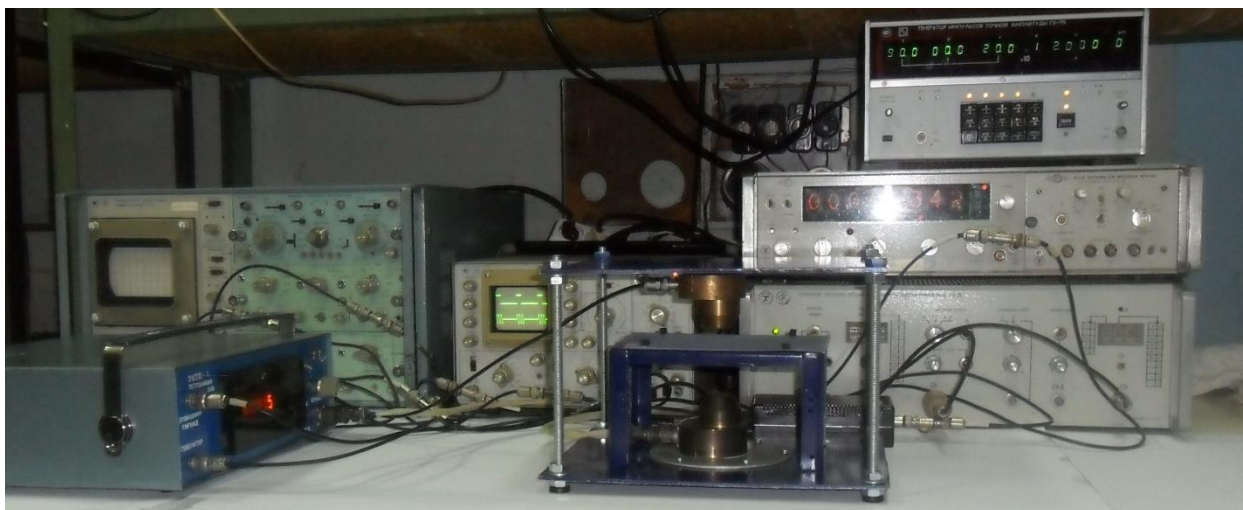


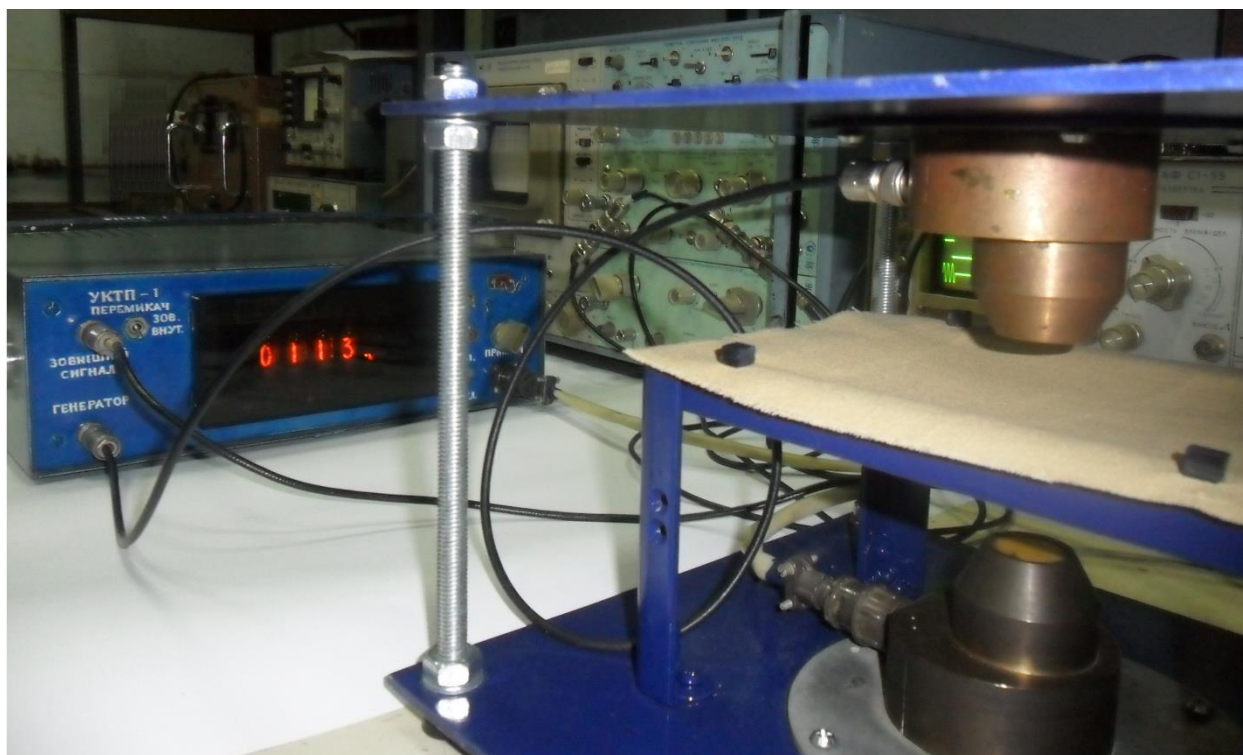
Рисунок 3.5 - Характеристика залежності величини вихідного сигналу пристрою УКТП – 1 від поверхневої густини η

контрольованої тканини:

$U_{вих.} = a + b \cdot \eta$, де $a = -1,20$ мВ; $b = 1,01$ мВ/(г/м²); коефіцієнт кореляції $r = 0,99$; критерій Фішера $F_{розр.} = 0,21 < F_{табл.} = 2,64$ при рівні значущості $\alpha_{знач.} = 0,05$



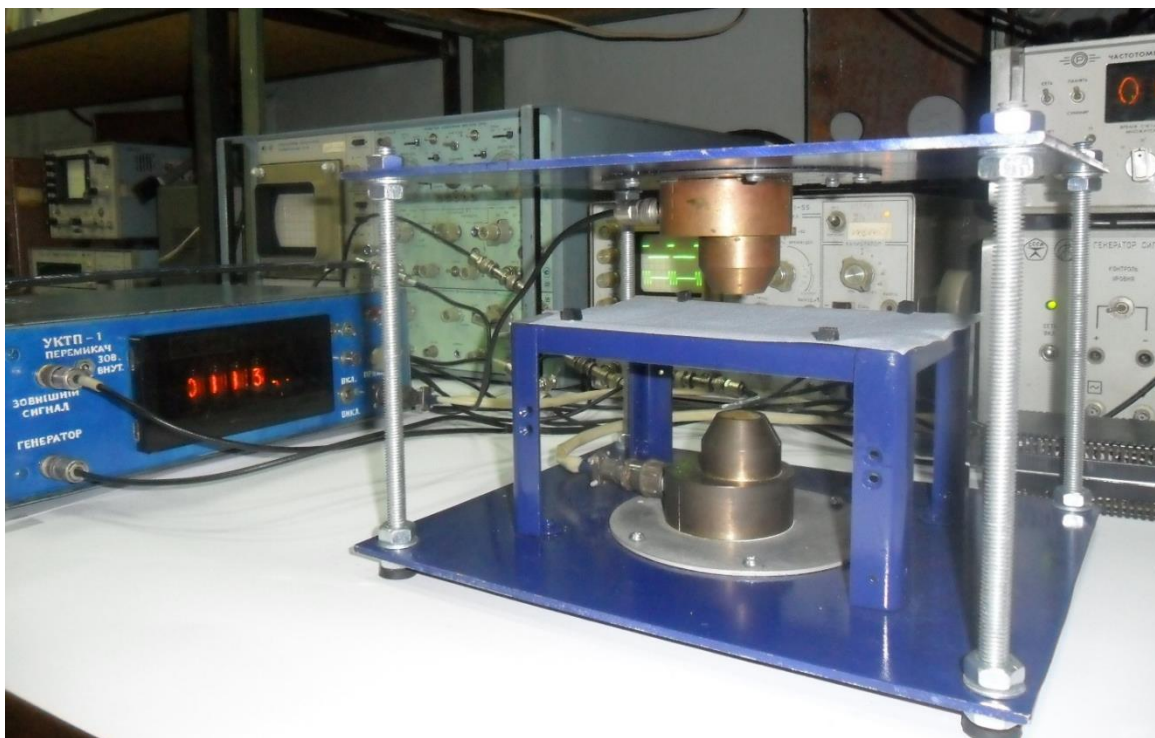
а



б

Рисунок 3.6 - Загальний вид експериментальної установки:

а – загальний вид експериментальної установки разом із ультразвуковим безконтактним пристроєм УКТП – 1; б – експериментальне безконтактне вимірювання поверхневої густини тканини арт.№1В1928/401, значення якої визначене ваговим методом та становить величину $113,4 \text{ г/м}^2$



а



б



в

Рисунок 3.7 - Експериментальне вимірювання поверхневої густини тканини арт. № 1В1928/180:

а – безконтактне вимірювання за допомогою пристрою УКТП – 1; б – зважування зразку тканини площею $S = 0,01 \text{ м}^2$; в – вигляд передньої панелі пристрою УКТП – 1 в процесі вимірювання поверхневої густини тканини.

$$D = D_i \cdot D_m, \quad (3.18)$$

де D_i – інструментальна вірогідність;

D_m – методична вірогідність.

Інструментальну вірогідність можна подати так:

$$D_i = 1 - \alpha_i - \beta_i, \quad (3.19)$$

де α_i – інструментальна помилка першого роду (поверхнева густина η контрольованої тканини, яка входить в межі допуску, визнана як така, що виходить за ці межі);

β_i – інструментальна помилка другого роду (поверхнева густина η контрольованої тканини, яка виходить за межі допуску, визнана як така, що входить в ці межі).

Помилки першого та другого роду можна подати наступними залежностями [73-76]:

$$\alpha_i = \int_{\eta_1}^{\eta_2} f(\eta) \left(\int_{\eta_1 - \Delta}^{\eta_1} \phi(\Delta) d\Delta + \int_{\eta_2}^{\eta_2 + \Delta} \phi(\Delta) d\Delta \right) d\eta, \quad (3.20)$$

$$\beta_i = \int_{\eta_2}^{\eta_2 + \Delta} f(\eta) \left(\int_{\eta_2 - \Delta}^{\eta_2} \phi(\Delta) d\Delta \right) d\eta + \int_{\eta_1 - \Delta}^{\eta_1} f(\eta) \left(\int_{\eta_1}^{\eta_1 + \Delta} \phi(\Delta) d\Delta \right) d\eta, \quad (3.21)$$

де $f(\eta)$ – густина розподілу ймовірностей поверхневої густини η ;

$\phi(\Delta)$ – густина розподілу ймовірностей похибок вимірювання поверхневої густини η ;

η_1, η_2 – межі допуску поверхневої густини η контрольованої тканини.

Значення поверхневої густини η та значення її похибок вимірювання розподілені за нормальним законом [77]:

$$f(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma\pi}} \cdot e^{-\frac{(\eta - \bar{\eta})^2}{2\sigma^2}}, \quad \phi(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta - \bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.22)$$

Межі допуску поверхневої густини η контрольованої тканини необхідно задати так, щоб вони входили в 5% відхилення від істинного значення [77]. В такому випадку можна вважати визначення зазначеного технологічного параметру достовірним. Тоді обчисливши вирази (3.20) – (3.22), можна отримати наступні значення $\alpha_i = 0,017$, $\beta_i = 0,008$, а $D_i = 0,975$. Після цього методичну вірогідність можна подати як:

$$D_m = \frac{K_{n.}}{K_{np.}}, \quad (3.23)$$

де $K_{n.}$ – кількість параметрів, які враховуються;

$K_{np.}$ – кількість параметрів, що впливають на прийняття рішення.

У нашому випадку завдяки налаштуванню пристрою під контрольовані тканини, що мають однакові середні відстані між центрами ниток, з врахуванням параметрів, які можуть вплинути на прийняття рішення, можна прийняти $D_m = 1$, а $D = 0,975$.

Проведені дослідження та аналіз дають можливість навести в табл. 3.4 основні метрологічні характеристики ультразвукового пристрою УКТП – 1.

Таблиця 3.4 - Основні метрологічні характеристики ультразвукового пристрою УКТП – 1

№ п/п	Параметри	Значення
1.	Діапазон поверхневої густини тканан	$(100 \div 350) \text{ г/м}^2$
2.	Основна відносна похибка вимірювання	$\pm 2 \%$
3.	Додаткова відносна похибка вимірювання, яка може виникати, коли кут нахилу тканини буде змінюватися в межах від 0° до 10°	$\pm 0,6 \%$
4.	Додаткова відносна похибка вимірювання, яка може виникати при зміні температури навколишнього середовища від 20°C до 40°C	$\pm 0,8 \%$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено ультразвуковий метод контролю поверхневої густини η тканин, який дозволяє контролювати зазначений технологічний параметр з виключенням впливу структурних показників, об'ємної густини ρ_2 та пористості Q тканин на результати вимірювань.

2. Розроблено ультразвуковий пристрій УКТП – 1 та експериментальну установку, які дають змогу проводити дослідження та контролювати поверхневу густину η різних тканин безконтактним методом.

3. Проведено порівняння між вимірюванням поверхневої густини η контрольованої тканини ультразвуковим безконтактним пристроєм УКТП – 1 та між її визначенням, яке здійснювалося за допомогою взірцевих ваг ТВЕ – 021. Експериментально доведено, що основна похибка вимірювань поверхневої густини тканин за допомогою розробленого ультразвукового пристрою УКТП-1 не перевищує $\pm 2 \%$.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

«УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТКАНИН»

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів. В загальному розробка стартап-проекту включає в себе декілька етапів першим з яких являється маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає в себе розробку та опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів. При цьому аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації. На базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту. Наступним етапом являється організація стартап-проекту, що включатиме в себе складання календарного план-графіку реалізації стартап-проекту, проводиться розрахунок потреби в основних засобах та нематеріальних витратах, визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі. Четвертим етапом являється фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту, що буде включати в себе визначення обсягу інвестиційних витрат, розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту), визначатиметься рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики). На останньому етапі проводиться визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів, складається інвест-пропозиції (оферти): стислої

характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом, планування заходів з просування офerti: визначення комунікаційних каналів, площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів, планування ресурсів для реалізації заходів з просування офerti. Дані етапи реалізовані послідовно та вчасно тому створюють передумови для успішного ринкового старту. В ході даного розділу буде проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, де буде проаналізовано ринкові можливості для реалізації продукту та відмінності від конкурентів. На базі аналізу ринкового середовища розроблено стратегію ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту, задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

4.1 Опис ідеї

Розглянувши в попередніх розділах основні аспекти теми, можна приступити до розробки стартап-проекту. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап-проекту.

Основна ідея проекту полягає в тому, щоб знизити відсоток браку за рахунок виключення можливості випуску тканин, поверхнева густина яких виходить за межі регламентованих допусків, що уточнено наведено в таблиці 4.1.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ультразвуковий засіб технологічного контролю поверхневої густини тканин	Побутове використання	Відсутність шкідливого впливу на людину від випромінювання, покращення якості готової продукції
	Виробництво	

Отже, пропонується кращий вибір безконтактного методу вимірювання густини тканин, який при перевірці тканини не матиме шкідливого впливу після його обробки.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі) значення; б) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ н/ п	Техніко- Економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект Ультразвукове вимірювання	Радіоізотопне вимірювання		
1	Вартість розробки та виготовлення	15000грн	30000\$	-	+
2	Вартість обслуговування	1000 грн	1000\$	-	+
3	Надійність	Висока	Низька	-	+
4	Похибки вимірювання	Немає	Середня	-	+
5	Вимірювання різних параметрів	Висока	Середня	-	+
6	Захист персоналу	Не потрібен	Потрібен	-	+
7	Утилізація	Не потрібен	Висока вартість утилізації	-	+

Висновок: Після порівняння характеристик проекту з його конкурентом був визначений перелік слабких, сильних характеристик і властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Як можна спостерігати з таблиці головними перевагами проекту для потенційних користувачів стала вартість розробки, точність та вимірювання різних параметрів тканин без ризику для здоров'я.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

В таблиці 4.3 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення якості тканин без пошкодження	Використання безконтактного методу контролю тканин	Існуюча технологія, не поширена в виробництві	Доступна технологія
2	Визначення поверхневої густини η	Використання значень амплітуди ультразвукової хвилі, яка пройшла крізь матеріал ниток	Наявна технологія	Доступна технологія
3	Контролювання зазначених технологічних параметрів з виключенням впливу структурних показників	Ультразвуковий метод контролю поверхневої густини η тканин, об'ємної густини ρ_2 та пористості Q тканин на результати вимірювань	Існуюча технологія, не поширена в виробництві	Доступна технологія

4	Не потрібно тривалого переналаштовувати на різні види тканин, прибор є без еталонним	Не потребує при зміні та сорту поверхневої густини тканин	Наявна технологія	Доступна технологія
5	Вплив зміна куту нахилу тканини у вимірювально зазорі	Не потрібно стабілізувати положення тканини у вимірювальному зазорі	Наявна технологія	Доступна технологія
6	Похибка вимірювання тканини відповідно на якість готової продукції по її поверхневої густини	Результат вимірювання не впливає зміна куту нахилу тканини у вимірювально зазорі між перетворювачем при зміні натягу тканини	Наявна технологія	Доступна технологія
7	Підвищення точності вимірювання	Не потрібно налаштовувати	Наявна технологія	Доступна технологія
8	Сертифікація для продажу та використання в наукових міжнародних проектах	Проходження наукової сертифікації	Наявна технологія	Доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: за рахунок використання безконтактного методу що не пошкоджує матеріал під час обробки				

Висновок: проаналізувавши таблицю 4.3. можемо зробити висновок, що реалізація проекту можлива. Обрана технологія – підвищення точності та простоти контролю тканин безконтактним методом який при використанні не пошкоджує матеріал вимірювання. Зменшиться похибка з урахуванням технологічних параметрів з виключенням структурних показників, це в свою чергу дозволить вести достойну конкуренцію на ринку технологій.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У даному підрозділі визначаються ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями

розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	150000 (15000*10)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Патентування продукту
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	71%

Висновок: коефіцієнт рентабельності досить високий, а також ринок являється доволі перспективним, оскільки потребує нових розробок та нових рішень. Середня норма рентабельності складає більше 71%, а це в свою чергу, найбільше приваблює інвесторів. Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Безперервний оперативний технологічний контроль різних параметрів тканин безпосередньо в процесі виробництва	Компанії, що спеціалізуються на текстильних матеріалах	Відмінність у факторах які впливають на вимірювання	-до продукції: Низька ціна, висока якість та точність кінцевого продукту -до компанії постачальника зворотній зв'язок, усенення неполадок присторою

Висновок: з огляду таблиці видно, що найбільш головною потребою, яка формує ринок, став: безперервний оперативний технологічний контроль безпосередньо в процесі виробництва. При цьому потенційні клієнти потребують нижчої ціни та високої точності виготовлення.

Ринкові можливості – це сприятливі обставини, які підприємство може використовувати для отримання переваг. Як приклад ринкових можливостей можна привести погіршення позицій конкурентів, різке зростання попиту, появу нових технологій виробництва продукції, зростання рівня доходів населення і т. п. Слід зазначити, що можливостями з погляду SWOT-аналізу є не всі можливості, які існують на ринку, а тільки ті, які можна використовувати.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища, що сприяють ринковому впровадженню (табл. 4.6.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.7.),. Результати занесемо до таблиці в порядку зменшення значущості:

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Можливість появи на ринку іноземних аналогів з кращими характеристиками і нижчою ціною.	Вивчення продукції конкурентів та вдосконалення своєї, для задоволення всіх потреб користувачів.
2	Інфляція	Зміна курсу гривні, за рахунок чого можуть зменшитися продажі	Реалізація продукту в більш стабільній (іноземній) валюті та моніторинг економічної ситуації в країні
3	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4	Світова криза	Може вплинути на коло потенційних покупців.	Пошук нових клієнтів на міжнародному ринку
5	Постачання	Проблема з фірмами постачальниками	Зміна політики розповсюдження продукту
6	Технічний	Збій в роботі пристрою	Створення кваліфікованої групи технічної підтримки та надання інструкції по експлуатації при придбанні товару.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання конкурентів	Зростання конкурентноспроможних компаній або фірм	Покращення характеристик системи, випуск нових конкуренто-спроможних продуктів
2	Поява схожих алгоритмів управління у конкурентів	Фірми-конкуренти можуть розробити аналогічні або наближені алгоритми	Патентування та подальше удосконалення
3	Технології	Розвиток нових сучасних технологій	Перехід на сучасні технології
4	Економічні	Політика проєкціонізму	Зміна податкового тиску

Висновок: насправді негативних факторів існує більше, ніж представлено в таблиці, в результаті того що даний сегмент ринку є достатньо насиченим це не зменшує можливість негативного впливу.

Далі проведемо аналіз пропозиції (табл. 4.8.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку:

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції:	Олігополія	Потрібно працювати над репутацією компанії, забезпечуючи високу якість приладу.
2. За рівнем конкурентної боротьби:	національний	Потрібно максимально розширювати горизонти співпраці
3. За галузевою ознакою:	Міжгалузева	Потрібно розширювати попит на ринку
4. Конкуренція за видами товарів:	товарно-видова	Підвищення якості та ефективності продукту
5. За характером конкурентних переваг:	Нецінова	Підприємство може працювати над покращенням системи управління, схемотехніки, застосуванні якісніших компонентів
6. За інтенсивністю: марочна	Не марочна	Збільшення кількості реклами

Висновок: провівши ступеневий аналіз на ринку, видно що існує достатня кількість фірм, але за рахунок залучення нових систем управління та покращення перевірки тканин дасть нам змогу підвищити якість адаптивної системи, не піднімаючи при цьому ціну на продукт, за рахунок цих маніпуляцій.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 4.9.)

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На ринку існує один прямий конкурент	Потенційним і конкурентами є іноземні компанії які згодом можуть вийти на наш ринок. Патенти на продукти. Законодавчі обмеження. Гнучкі ціни	Постачальниками є компетентні інтернет магазин. Диференціація витрат. Концентрація постачальників. Значення розміру поставок	Компанії, що спеціалізуються на текстильних матеріалах	Позиції компанії в даному випадку суттєві адже подібні за характеристиками аналогами практично відсутні
Висновки:	Слідкувати за пропозиціями конкурентів, та працювати над зменшенням витрат на виробництво.	Висока вірогідність появи нових гравців на ринку адже бар'єри є не дуже високими. Потенційних конкурентів немає	Наявність високої кількості постачальників не дає їм змогу контролювати умови роботи на ринку.	Розробка нових пропозицій для клієнтів та зменшення ціни дозволить задовільнити потреби покупців.	Зайняти стабільну позицію на ринку та конкурентів у перевагу, розроблявали нові види товарів

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. (Табл.4.10-4.11)

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Підтримка зворотного зв'язку з клієнтами, усунення виниклих проблем при роботі, вдосконалення приладу, а відповідно збільшення попиту на продукт, що в результаті дозволить знизити ціну.
2	Велика кількість постачальників	Наявність приладу та своєчасна доставка продукту клієнту.
3	Висока якість	Висока якість і точність приладу, яка дозволяє клієнту отримувати максимально точний результат вимірювань.
4	Технічна підтримка	Наявність досвідчених спеціалістів, які зможуть швидко вирішити будь яку проблему в роботі приладу.
5.	Наявність патентів	Наявність патенту на приладу, це дає споживачу

Висновок: провівши аналіз конкуренції в галузі за М. Портером видно, що є один прямий конкурент і в нього висока репутація що впливається в необхідність підвищувати репутацію своєї компанії на той самий рівень (в перспективі).

На основі аналізу конкуренції в галузі, проведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, які були розглянуті в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз конкурентоспроможності представлено в табл. 4.10.

Таблиця 4.11 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з адаптивною системою управління						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Рівень якості товарів	18						+	
2	Готова методика виготовлення	17				+			
3	Гнучкість	17						+	
4	Елементна база	19						+	
5	Цінова політика	14				+			
6	Репутація	18							+
7	Обслуговування	16					+		

Висновок: як можна побачити з таблиці було обґрунтовано сім факторів конкурентоспроможності, основними з яких стали: цінова політика (як показує практика це стоїть на першому місці для клієнта), рівень якості товару та його стабільність (найважливіший фактор) та репутація компанії, оскільки якщо перші два фактори співпадатимуть з очікуваннями клієнта, репутація компанії його схилить в потрібний бік.

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вартість розробки та виготовлення; 2. Вартість обслуговування; 3. Висока якість товару; 4. Надійність; 5. Вимірювання різних параметрів; 6. Захист персоналу; 7. Утилізація. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя; 2. Необхідність значного початкового капіталовкладення (кредит в банку)
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Збільшення продаж; 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників; 4. Зменшення податкового тиску, отримання тендерів на послуги. 5. Збільшення потенційних клієнтів через технічну підтримку. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку малих фірм. 3. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу; 4. Зменшення продажів через несвоєчасне виконання замовлень

Висновок: для успішності стартап-проекту необхідно передбачати появу несприятливих умов для можливості швидкого реагування, коригування дій і, відповідно, зменшення негативних наслідків. Для подолання низької репутації необхідно постійно покращувати свою продукцію.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1 рік
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові компанії	Середня	Залежність від рівня економічного розвитку в цілому	Середня	Середня складність
2	Державні лабораторії контролю за якістю			Середня	Середня складність
Цільова група: дослідницьке моделювання, будівництво					

Висновок: за результатами аналізу потенційних груп споживачів ми брали цільові групи такі як промислові компанії та державні заклади контролю якості. Цей вибір було зроблено через не досить високу інтенсивність конкуренції в обраних сегментах та через невисокі складності для входу у вибрані сегменти. А якщо ціна нашого товару буде відповідати бажанням клієнтам то потрапити в цей сегмент буде дуже просто.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15.)

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотній зв'язок з клієнтами.	Стратегія диференціації

Висновок: визначена базова стратегія розвитку проекту – стратегія диференціації, оскільки ця стратегія зорієнтована на задоволення певних потреб клієнта, а саме висока якість, яка підвищує лояльність покупців, створюючи труднощі для альтернативних продавців у боротьбі за їхню прихильність. Якість товарів дає змогу встановлювати вищі ціни, так як споживачі готові їх сприйняти.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.13).

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде створено унікальну продукцію	Зайняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 - . Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів	Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка. Якість
2	Обслуговування	Стратегія диференціації	Легке обслуговування	Легкість простота в використанні, якість, швидкість

3	Якість	Стратегія диференціації	Швидкість, гнучкість	Ціна, якість
---	--------	-------------------------	----------------------	--------------

Висновок: крім високої якості та низької ціни потребує легкості в обслуговуванні, простоти в використанні.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Високі характеристики стабільності системи управління, простота у використанні	Можливість підвищити якість та точність вихідних параметрів за рахунок кращих, дорожчих алгоритмів управління. Швидка адаптація (простота в використанні)
2	Відмовостійкість	Стабільність роботи приладу	Висока стабільність за рахунок ретельної розробки схеми.

Висновки: вигідними сторонами товару являються високі характеристики стабільності системи управління та простота у використанні, точність вихідних параметрів та високу стабільність, що надає перевагу даному пристрою у порівнянні з його прямим конкурентом. В майбутньому, використання безконтактного методу дозволить вивести програму на високий рівень.

Таблиця 4.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Дослідження та розробка безконтактного ультразвукового пристрою для оперативного технологічного контролю поверхневої густини тканин.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Довговічність (немає строку давності)	Нм	Тх
	2. Гарантійний термін (довгий термін гарантійного обслуговування)	Нм	Е
	3. Досконалість виробничого виконання (Ергономічний дизайн)	Нм	Тл
	4. Вартість обслуговування (Низька вартість обслуговування)	Нм	Вр
	Якість: відповідає нормам ГОСТ 3811 – 72		
	Пакування: металічної коробки		
III. Товар із підкріпленням	До продажу з введенням у роботу		
	Після продажу – технічна підтримка, гарантійне обслуговування		
Потенційний товар буде захищено від копіювання за рахунок логотипу, введення комерційної таємниці на розрахунки та конструкцію модуля, патент			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	10000-20000	30000	25000	10000-40000

Висновок: як видно з таблиці збільшення кількості клієнтів дозволить знизити ціну на пристрій, що може бути нижчою, ніж ціна на сучасні аналоги. Нижній рівень відповідає ціни товарів-замінників, які можна використовувати в системах, там де висока точність та ефективність не потрібна, наш пристрій це золота середина з відносно низькою ціною та підвищеною якістю продукту після технологічного контролю.

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має Виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Попереднє замовлення з підписанням контракту	Доставка в строки, контроль за уникненням пошкоджень.	Пряма	Пряма

Висновок: у зв'язку з тим, що обслуговується вузький сегмент ринку доцільніше не використовувати посередників, а застосовувати прямий канал збуту. Це дасть змогу точніше контролювати ціни у порівнянні з конкурентами, і зосередити доходи в одних руках, не розсіюючи їх на посередників.

Таблиця 4.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Огляд продукту, перспективи на майбутнє	Інтернет, гаряча лінія технічної підтримки	Встановлення мети позиціонування. Розробка стратегії позиціонування. Розробка комплексу маркетингу. Оцінка ефективності позиціонування.	Розповсюдження інформації про продукт	Підкреслення переваг продукту

Висновок: Було обрано ключові позиції: маркетингові дослідження, встановлення мети позиціонування, розробка стратегії позиціонування, розробка тактики позиціонування, розробка комплексу маркетингу, оцінка ефективності позиціонування. Розглянуто завдання рекламного повідомлення та концепцію рекламного звернення.

Висновки до розділу 4

Пропонується ультразвуковий метод контролю поверхневої густини тканин, який дозволяє контролювати зазначений технологічний параметр з виключенням впливу структурних показників, об'ємної густини та пористості тканин на результати вимірювань, що основна похибка вимірювань поверхневої густини тканин за допомогою розробленого ультразвукового пристрою УКТП-1 не перевищує $\pm 2\%$. Таким чином, цей метод має підвищену ефективність відносно базового методу представлених на ринку.

Зважаючи на проведений аналіз ринку потенційного стартап-проекту, можна із впевненістю стверджувати, що точна та дешева у реалізації програма буде привертати увагу потенційних інвесторів у проект, а розрахована рентабельність буде вигідніша за банківські вклади майже вдвічі, це призведе до потенційно успішного стартапу. Розвиток ультразвукового безконтактного методу має великий успіх у реалізаціях, оскільки інвестори бажають витратити гроші на проекти, які можуть давати реальний прибуток.

Сильними сторонами проекту стали висока якість та ціна за одну одиницю виробу, що в порівнянні з конкурентами дає великий бонус в боротьбі за кінцевого споживача. Також досить невелика ціна в 15000 грн приверне увагу для дослідницької сфери.

Можливим конкурентом в методах безконтактного вимірювання є радіоізотопний метод, що має досить високі показники якості, але досить велику ціну. Перевагою розроблювального проекту – його фінансова складова, яка не потребує значних капіталовкладень, але прибуток з продажів може виправдати себе дуже скоро. Розроблений метод для підвищення експлуатаційних характеристик кінцевого продукту і буде на порядок привабливішим для потенційних клієнтів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз показав, що на сьогоднішній день у текстильній промисловості використовують руйнівні контактні методи вимірювання поверхневої густини тканин, які базуються на вирізанні та зважуванні зразків тканин. Показана доцільність використання безконтактних методів вимірювання, зокрема ультразвукового безконтактного методу.

2. Проаналізовані особливості розповсюдження ультразвукових хвиль у тканинах, які пов'язані з різними розмірами пор та іншими структурними показниками тканин, які впливають на проходження та відбиття ультразвукових хвиль. Отримані залежності, які пов'язують амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль як із зміною самих діаметрів ниток основи та утку, так і безпосередньо з поверхневою густиною тканини.

3. Доведено, що згасанням ультразвукових коливань для більшості тканин можна знехтувати, а вибором частоти ультразвукових хвиль можна знизити вплив згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових сигналів при наявності його в тканинах. Також доведено, що при досить малому згасанні ультразвукового сигналу, коли відношення акустичних опорів повітря (Z_1) та тканини (Z_2) $Z_1/Z_2 \ll 1$, залежності для амплітуд хвиль, які пройшли крізь контрольовану тканину, та для хвиль, що відбилася від неї, спрощуються. Це дає можливість визначати поверхневу густину тканин, без визначення їх об'ємної щільності та швидкості розповсюдження в них ультразвукових коливань.

4. Визначено, що для підвищення вірогідності контролю, необхідно виключити похибки, які викликані багаторазовим відбиттям хвиль від ниток та їх накладанням. Це залежить від положення самої тканини відносно перетворювачів, між якими вона розташовується. Доведено, що необхідно в такому випадку застосовувати імпульсний ультразвуковий сигнал. Отримано залежності амплітуди ультразвукових хвиль від поверхневої густини для імпульсного сигналу, що пройшов крізь контрольовану тканину.

5. Доведено, що для визначення зміни пористості контрольованої тканини, можна використовувати значення амплітуди відбитої від неї ультразвукової хвилі, не проводячи при цьому досліджень із скануванням самої тканини та наступним визначенням розмірів пор. На базі проведених досліджень розроблено ультразвуковий метод контролю поверхневої густини тканин, який дозволяє визначати зазначений технологічний параметр з виключенням впливу показників структури, об'ємної щільності та пористості тканин на результати вимірювань.

6. Розроблено ультразвуковий пристрій та експериментальну установку, які дають змогу проводити дослідження та контролювати поверхневу густину в діапазоні $(100 \div 350) \text{ г/м}^2$ для різних тканин безконтактним методом.

7. Проведено порівняння між вимірюванням поверхневої щільності контрольованої тканини ультразвуковим безконтактним пристроєм з відносною похибкою, яка не перевищує $\delta_{np} < \pm 2\%$, та між її визначенням, яке здійснювалося за допомогою взірцевих ваг з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta = 0,001 \text{ г}$. Порівняння результатів вимірювань показало, що можливо проводити безперервний оперативний безконтактний контроль поверхневої густини тканин без вирізання зразків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартынова А.А. Строение и проектирование тканей / А. А. Мартынова, Г.Л. Слостина, Н.А. Власова. – М.: РИО МГТА, 1999. – 434 с.
2. Дамянов Г.Б. Строение ткани и современные методы ее проектирования / Г.Б. Дамянов, Ц.З. Бачев, Н.Ф. Сурнина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 240 с.
3. Сурнина Н.Ф. Проектирование ткани по заданным параметрам / Н.Ф. Сурнина. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 142 с.
4. Новиков Н.Г. О строении и проектировании ткани с помощью геометрического метода / Н.Г. Новиков // Текстильная промышленность. – 1946. – №6. – С. 24 – 28.
5. Хвальковский В.Н. Теория переплетений и анализ тканей / В.Н. Хвальковский. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1980. – 327 с.
6. Чистова И.Н. Взаимодействие нитей основы и утка в тканях полотняного переплетения / И.Н. Чистова, С.Г. Степанов // Изв. вузов. Технология текстильной пром-ти. – 1997. – № 1. – С. 44 – 48.
7. Ефремов Д.Е. Параметры строения ткани при овальном поперечном сечении нити / Д.Е. Ефремов, Билал Махмуд // Изв. вузов. Технология текстильной пром-ти. – 1989. – № 2. – С. 48 – 51.
8. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества / [К.Г. Гущина, С.А. Беляева, Е.Я. Командрикова и др.]. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. – 312 с.
9. Алимова Х.А. Изменение исходных свойств нитей при формировании ткани / Х.А. Алимова, А.Д. Даминов, Д.Д. Иногамджанов // Изв. вузов. Технология текстильной пром-ти. – 2001. – № 3. – С. 118 – 120.
10. Сеницын В.А. Методика оценки напряженности выработки ткани на ткацких станках / В.А. Сеницын // Изв. вузов. Технология текстильной пром-ти. – 1995. – № 4. – С. 49 – 53.
11. Здоренко В.Г. Дослідження похибки розрахункового методу

визначення поверхневої щільності тканин / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник КНУТД. – 2013. – №2(70). – С. 16 – 21.

12. Мороз А.Н. Исследование параметров чувствительности пьезо-электрического датчика цилиндрической формы для измерения звукового давления при мойке шерсти / А.Н. Мороз // Вісник НТУ “ХПІ”. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. — Харків: НТУ “ХПІ”. – 2010. – № 36. – С.89 – 93.

13. Дзенис В.В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля / В.В. Дзенис. – Рига: Зинатне, 1987. – 263 с.

14. Марков Н.М. Влияние измерительного усилия на погрешность измерения / Н.М. Марков, П.А. Сацердотов // Измерительная техника. – 1981. – № 11. – С. 26 – 27.

15. Сергеева А.И. Оценка поправок на локальные деформации при контактных измерениях толщины изделий из низкомодульных материалов / А.И. Сергеева, Я.М. Цейтлин, Н.И. Кармалицын // Измерительная техника. – 1990. – № 3. – С. 17 – 18.

16. Застрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров / Ю.Ф. Застрогин. – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с.

17. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: в 2-х книгах / А.С. Боровиков, Э.И. Вайнберг, В.И. Горбунов и др.; под ред. В.В. Ключева. Кн.1. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

18. Викторов В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 209 с.

19. Пугачев А.В. Радиоизотопные приборы технологического контроля: Справочник / А.В. Пугачев, Э.В. Сахаров, В.А. Долинин. – М.: Атомиздат, 1980. – 96 с.

20. Гельфанд М.Е. Радиоизотопные приборы и их применение в промышленности: Справочное пособие / М.Е. Гельфанд, В.М. Калошин,

Г.Н. Ходоров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.

21. Кармалицын Н.И. Образцовые меры поверхностной плотности для поверки и градуировки радиоизотопных толщиномеров / Н.И. Кармалицын, З.А. Тутане // Измерительная техника. – 1975. – № 5. – С. 30 – 31.

22. А. с. 949412 СССР, МКИ G01N9/24. Устройство для измерения поверхностной плотности ткани / Л.Н. Смирин, А.И. Серебренников, С.Ю. Коломицин (СССР). – № 2975529/18-25; заявл. 26.08.80; опубл. 07.08.82, Бюл. № 29.

23. Матис И.Г. Електроємкостні преобразователи для неразрушающего контроля / И.Г. Матис. – Рига: Зинатне, 1977. – 326 с.

24. Высоцкий А. В. Конструирование и наладка пневматических устройств для линейных измерений / А.В. Высоцкий, А.П. Курочкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 153 с.

25. Цидулко Ф.В. Точность пневматического контроля линейных размеров / Ф.В. Цидулко. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 155 с.

26. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: в 2-х книгах / В.Г. Герасимов, А.К. Гурвич, А.П. Дегтерев и др.; под ред. В.В. Ключева. Кн.2. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

27. Костюков А.Ф. Исследование влияния упорядоченного множества волокон на волновые соотношения ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2011. – № 5. – С. 90 – 94.

28. Костюков А.Ф. Приборы и методы лабораторного контроля основных технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2011. – № 3. – С. 95 – 98.

29. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2010. – № 3. – С. 94 – 98.

30. Костюков А.Ф. Экспериментальное определение свойств волокон с помощью акустических колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2010. – № 9. – С. 84 – 87.

31. Горбатов А.А. Акустические методы измерения расстояний и управления / А.А. Горбатов, Г.Е. Рудашевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208с.
32. Хакимов О.Ш. Акустические методы и приборы для контроля и исследования ориентированных полимеров / О.Ш. Хакимов, П.К. Хабибуллаев. – Ташкент: ФАН, 1990. – 268 с.
33. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
34. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом / Г.М. Сучков // Контроль. Диагностика. – 2001. – №12. – С. 36 – 39.
35. Мороз А.Н. Теоретическое исследование взаимодействия звуковых колебаний со слоем среды, моделирующей шерсть / А.Н. Мороз // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – № 11(69). – С. 49 – 60.
36. Мороз О.М. Використання акустичних коливань в технологічних процесах виробництва / О.М. Мороз, О.Д. Черенков, Ю.Ф. Свергун // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – Вип. 43, Т. 1. – С. 145 – 151.
37. Кажис Р.И. Ультразвуковые информационно-измерительные системы / Р.И. Кажис. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 216 с.
38. Демаркас В.Й. Ультразвуковая эхоскопия / В.Й. Демаркас, Э.Л. Пилецкас. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 276 с.
39. Кондратьев Ю.А. Исследование искажений акустического сигнала при его распространении в среде с частотно-зависимым коэффициентом затухания / Ю.А. Кондратьев, А.В. Половинкин // Технические средства диагностирования. – 1987. – С. 3 – 12.
40. Третьяков В.А. Искажение акустического импульсного сигнала при прохождении через кристаллические образцы малых размеров / В.А. Третьяков, И.П. Фирсов // Прикладная акустика. – 1977. – С. 123 – 128.

41. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения / А.Е. Колесников. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 240 с.
42. Ананьев Л.М. Анализ прохождения звуковых колебаний через слой волокнистого материала / Л.М. Ананьев, П.Н. Бобров, Л.А. Спицын // Технология текстильной промышленности. – 1974.– № 4. – С. 25 – 29.
43. Бобров П.Н. Применение ультразвука для исследования свойств волокна/ П.Н. Бобров, Ф.К. Волосников, В.А. Козубенко // Текстильная промышленность. – 1974.– № 3. – С. 64 – 65.
44. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д.И. Блохинцев. – М.: Физматгиз, 1946. – 100 с.
45. Шендеров Е.Л. Прохождение звука через трансверсально-изотропную пластину / Е.Л. Шендеров // Акуст. журн. – 1984.– Т30, № 1. – С. 122 – 129.
46. Lyons D., Graham J. Acoustic measurement of fiber properties / D. Lyons, J. Graham // Textile Research Journal. – 1975.– No.7. – P. 549 – 553.
47. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
48. Куликовский К.Л. Методы и средства измерений / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 447 с.
49. Разумный В.М. Оценка параметров автоматического контроля / В.М. Разумный. – М.: Энергия, 1975. – 80 с.
50. Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля / Ю.М. Шкарлет. – М.: Машиностроение, 1974. – 57 с.
51. Лютак І.З. Математична модель обробки сигналу ультразвукових пластинчатих хвиль / І.З. Лютак // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 2 (16). – С. 178 –183.
52. Лютак І.З. Адаптивний алгоритм обробки вимірюного ультразвукового сигналу в частотній області / І.З. Лютак, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – №16 – С. 15–18.
53. Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры / М.В. Королев. – М.:

Машиностроение, 1980. – 111 с.

54. Буденков Г.А. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля / Г.А. Буденков, С.Ю. Гуревич // Дефектоскопия. – 1981. – № 5. – С. 5 – 33.

55. Ciarkowski A. Plane wave diffraction by a wedge-a spectral domain approach / A. Ciarkowski, J. Boersma, R. Mittra // IEEE Trans. on Ant. and Prop. – 1984. – No. 1. – P. 20 – 29.

56. Акустический метод исследования тканей / А. Н. Григорьев, В.А. Берестенев, Л.А. Флексер, И.Р. Бренер // Текстильная промышленность. – 1976. – №7. – С. 75 – 76.

57. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

58. Защепкіна Н.М. Ультразвуковий пристрій для технологічного контролю якості текстильних матеріалів / Н.М. Защепкіна, В.Г. Здоренко // Вісник КНУТД. – 2007. – №5(37). – С. 40 – 43.

59. Здоренко В.Г. Дослідження безконтактного ультразвукового контролю поверхневої щільності тканин полотняного переплетіння / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник КНУТД. – 2011. – №4(60). – С. 27 – 31.

60. Здоренко В.Г. Визначення поверхневої щільності текстильних матеріалів безконтактним ультразвуковим методом / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко: тези доповідей VIII Міжнародної українсько-польської конференції молодих науковців [«Механіка та інформатика»], (Хмельницький, 12-14 травня 2011 р.) / М-во освіти і науки України, ХНУ. – Х., 2011. – С. 59 – 60.

61. Барилко С.В. Безконтактний метод контролю поверхневої щільності тканин / С.В. Барилко: тези доповідей I Міжнародної наукової конференції пам'яті професора Володимира Поджаренка [«Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»], (Вінниця, 18-20 жовтня 2011 р.) / М-во освіти і науки України, ВНТУ. – В., 2011. – С. 87.

62. Здоренко В.Г. Ультразвуковий контроль поверхневої щільності тканин / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. – 2012. – №1. – С. 82 – 88.
63. Здоренко В.Г. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. – 2013. – №3. – С. 90 – 96.
64. Харкевич А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Издательство физ. – мат. литературы, 1962. – 234 с.
65. Пат. 63663 Україна, МПК G01N7/00, G01N29/00. Пристрій для вимірювання часу проходження та згасання акустичних імпульсів / Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. – № u201106890; заявл. 01.06.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. №19.
66. Здоренко В.Г. Визначення зміни пористості тканини за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, Н.М. Защепкіна та ін. // Вісник КНУТД. – 2012. – №3. – С. 122 – 127.
67. Пат. 73763 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий спосіб визначення поверхневої щільності матеріалів / Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В., Єфіменко В.Б.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. – № u201202723; заявл. 06.03.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №19.
68. Muraо M., Iwashimizu Y. Measurement of Acoustoelastic Effect by Spectrum Analysis of Ultrasonic Waves. // Journal Society Material Sci. Jap.-2003.- v.34.- N387.- P.1472-1477.
69. Noronha P. J., Chapmen J. R., Wert J. J., Residual Stress Measurement and Analysis Using Ultrasonic Technics // Journal of Testing and Evaluation.- 2005.- v.1.- N3.- P. 209-214.
70. R. L. Goldberg and S. W. Smith, “Multilayer piezoelectric ceramics for two-dimensional array transducers,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 41, 761-771, 1994.

71. Schnieder E., Pitsch H., Hirsekork S. Non-destructive Detection and Analysis of Stress States with Polarised Ultrasonic Waves // Rev. Progr. Quant. NDE.- 2001.- v.4B.- P. 1079-1088.

72. Петров П.Н. Акустика. Электроакустические преобразователи: учебн. пособие / П. Н. Петров. – СПб.: СПбГУАП, 2003. – 80 с.

73. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г. Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.

74. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Івано-Франківськ: Видавництво „Факел”, 2002. – 400 с.

75. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення : ДСТУ 3215-95 [Чинний від 1996-07-01] – К.: Держстандарт України, 1996. – 28 с.

76. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, А. Ковальчик] ; за ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2005. – 532 с.

77. Барковський В. В. Теорія ймовірностей та математична статистика / В. В. Барковський, Н. В. Барковська, О. К. Лопатін. – К.: ЦУЛ, 2002. – 448 с.

78. Жиздецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. В. Ц. Жиздецького. Львів, Афіша. – 2000. 352 с.

79. Зеркалов Д.В. Охорона праці в галузі. Навчальний посібник. – К.: Основа. 2011. – 551 с.

ДОДАТОК А

Досліджувані зразки тканин



Рис. А.1. Досліджувані зразки тканин:

а – арт. № 2B0270/ЦВ32 з поверхневою густиною $\eta = 226 \text{ г/м}^2$; б – арт. № ОБР314/ЦВ233 з поверхневою густиною $\eta = 314 \text{ г/м}^2$; в – арт. № 28-4 з поверхневою густиною $\eta = 116 \text{ г/м}^2$; г – арт. № 26-1/10009-ХЕ з поверхневою густиною $\eta = 117 \text{ г/м}^2$; д – арт. № 22-1 з поверхневою густиною $\eta = 101 \text{ г/м}^2$; е – арт. № 1B3181/342 з поверхневою густиною $\eta = 237 \text{ г/м}^2$



Рис. А.2. Досліджувані зразки тканин:

а – арт. № 230 з поверхневою густиною $\eta = 163 \text{ г/м}^2$; б – арт. № 3-1 з поверхневою густиною $\eta = 115 \text{ г/м}^2$; в – арт. № 2-4 з поверхневою густиною $\eta = 119 \text{ г/м}^2$; г – арт. № 17-2/2В0117-ХЕ з поверхневою густиною $\eta = 97 \text{ г/м}^2$; д – арт. № 27-4 з поверхневою густиною $\eta = 113 \text{ г/м}^2$; е – арт. № 14-3 з поверхневою густиною $\eta = 172 \text{ г/м}^2$



Рис. А.3. Досліджувані зразки тканин:

а – арт. № 5B0032/424 з поверхневою густиною $\eta = 160$ г/м²; б – арт. №8B0132/231 з поверхневою густиною $\eta = 165$ г/м²; в – арт. № 8B0132/182 з поверхневою густиною $\eta = 169$ г/м²; г – арт. № 14-1 з поверхневою густиною $\eta = 178$ г/м²; д – арт. № 1-1/8B0111-ХЕ з поверхневою густиною $\eta = 101$ г/м²; е – арт. № 231 з поверхневою густиною $\eta = 172$ г/м²



Рис. А.4. Досліджувані зразки тканин:

а – арт. № 8B0122 з поверхневою густиною $\eta = 191 \text{ г/м}^2$; б – арт. № 2B1001 з поверхневою густиною $\eta = 133 \text{ г/м}^2$; в – арт. № 1B3181/435 з поверхневою густиною $\eta = 238 \text{ г/м}^2$; г – арт. № 7B0090 з поверхневою густиною $\eta = 233 \text{ г/м}^2$; д – арт. № 2B1001/29 з поверхневою густиною $\eta = 127 \text{ г/м}^2$; е – арт. № 2B3109/322 з поверхневою густиною $\eta = 258 \text{ г/м}^2$



Рис. А.5. Досліджувані зразки тканин:

а – арт. № 1В3188/434 з поверхневою густиною $\eta = 230 \text{ г/м}^2$; б – арт. №1В3188/32 з поверхневою густиною $\eta = 244 \text{ г/м}^2$; в – арт. № 2В0270/ЦВ322 з поверхневою густиною $\eta = 239 \text{ г/м}^2$; г – арт. № 7В0064 з поверхневою густиною $\eta = 228 \text{ г/м}^2$; д – арт. № 8В0124/660 з поверхневою густиною $\eta = 240 \text{ г/м}^2$; е – арт. № 8В0122/430 з поверхневою густиною $\eta = 202 \text{ г/м}^2$

ДОДАТОК Б

Розрахунки в системі mathcad

Б.1. Розрахунок коефіцієнта проходження для тканини з відсутніми наскрізними порами та з однаковими акустичними опорами $Z_2 = Z_3$ ниток основи та утку

$$\begin{aligned}
 i &:= \sqrt{-1} \quad 1.24 \cdot 331 = 410.44 \\
 z1 &:= 410.44 \quad z2 := 131600 \quad z3 := 131600 \quad z4 := 410.44 \quad K2 := 759.297 \quad K23 := 759.297 \quad d0 := 0.0002 \quad dy := 0.0002 \\
 W13 &:= \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z3)} \quad V13 := \frac{(z1 - z3)}{(z1 + z3)} \quad W34 := \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z4)} \quad W32 := \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z2)} \quad W23 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z3)} \\
 V12 &:= \frac{(z1 - z2)}{(z1 + z2)} \quad W12 := \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z2)} \quad W24 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z4)} \quad W21 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z1)} \quad V34 := \frac{(z3 - z4)}{(z3 + z4)} \\
 V31 &:= \frac{(z3 - z1)}{(z3 + z1)} \quad V24 := \frac{(z2 - z4)}{(z2 + z4)} \quad V21 := \frac{(z2 - z1)}{(z2 + z1)} \quad V23 := \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)} \quad V32 := \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)} \\
 g1 &:= 0 \quad g2 := 0 \quad g3 := 0.5 \quad g4 := 0.5 \\
 G1 &:= 0 \quad G2 := 0 \\
 G3 &:= g3 \cdot \frac{\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]}{\sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot (1 + V23) \cdot V34 \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]} \\
 G4 &:= g4 \cdot \frac{\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]}{\sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot (1 + V32) \cdot V24 \cdot (1 + V23) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]} \\
 W &:= G3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot V34 \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right] + G4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot V24 \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right] \\
 W &= 6.76719001664394 \times 10^{-4} + 0.026381460778989i \\
 W &:= g3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right] + g4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right] \\
 W &= 0.000676719001664 + 0.026381460778989i \\
 W &:= \frac{\left[\left(g1 \cdot W12 \cdot W24 + g2 \cdot W12 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4}} + \left(g3 \cdot 1 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 + g4 \cdot 1 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \right]}{1 - \left[\left(g1 \cdot V24 \cdot V21 + g2 \cdot V24 \cdot V21 \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \left(K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4} \right)} + \left[g3 \cdot \left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] + g4 \cdot \left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \frac{1}{4}} \right]} \\
 W &= 0.000676719001664 + 0.026381460778989i \\
 G3 &:= \frac{0.5}{(1 + V23) \cdot (1 + V32)} \quad G4 := \frac{0.5}{(1 + V23) \cdot (1 + V32)} \\
 W &:= \frac{\left[\left(G1 \cdot W12 \cdot W24 + G2 \cdot W12 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4}} + \left(G3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 + G4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \right]}{1 - \left[\left(G1 \cdot V24 \cdot V21 + G2 \cdot V24 \cdot V21 \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \left(K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4} \right)} + \left[G3 \cdot V21 \cdot (1 + V23) \cdot V34 \cdot (1 + V32) + G4 \cdot V31 \cdot (1 + V32) \cdot V24 \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \frac{1}{4}} \right]} \\
 W &= 0.000676719001664 + 0.026381460778989i \\
 W_{mod} &:= \sqrt{0.000676719001664^2 + 0.026381460778989^2} \\
 W_{mod} &= 0.026390138715826
 \end{aligned}$$

Б.2. Розрахунок коефіцієнта проходження для тканини з відсутніми наскрізними порами та із схожими акустичними опорами $Z_2 \approx Z_3$ ниток основи та утку

$$\begin{aligned}
 i &:= \sqrt{-1} & 1.24 \cdot 331 &= 410.44 \\
 z1 &:= 410.44 & z2 &:= 122400 & z3 &:= 131600 & z4 &:= 410.44 & K2 &:= 759.297 & K23 &:= 759.297 & d0 &:= 0.0002 & dy &:= 0.0002 \\
 W13 &:= \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z3)} & V13 &:= \frac{(z1 - z3)}{(z1 + z3)} & W34 &:= \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z4)} & W32 &:= \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z2)} & W23 &:= \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z3)} \\
 V12 &:= \frac{(z1 - z2)}{(z1 + z2)} & W12 &:= \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z2)} & W24 &:= \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z4)} & W21 &:= \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z1)} & V34 &:= \frac{(z3 - z4)}{(z3 + z4)} \\
 V31 &:= \frac{(z3 - z1)}{(z3 + z1)} & V24 &:= \frac{(z2 - z4)}{(z2 + z4)} & V21 &:= \frac{(z2 - z1)}{(z2 + z1)} & V23 &:= \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)} & V32 &:= \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)} \\
 g1 &:= 0 & g2 &:= 0 & g3 &:= 0.5 & g4 &:= 0.5 \\
 G1 &:= 0 & G2 &:= 0 \\
 G3 &:= g3 \cdot \frac{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]}{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot (1 + V23) \cdot V34 \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n} \\
 G4 &:= g4 \cdot \frac{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]}{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot (1 + V32) \cdot V24 \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n} \\
 W &:= G3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot V34 \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} + G4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot V24 \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \\
 W &= 7.26580339548326 \times 10^{-4} + 0.027335432331199i \\
 W &:= g3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n + g4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \\
 W &= 0.000726580339548 + 0.027335432331199i \\
 W &:= \frac{\left[\left(g1 \cdot W12 \cdot W24 + g2 \cdot W12 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K2 \cdot d0 \cdot \frac{n}{4}} + \left(g3 \cdot 1 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 + g4 \cdot 1 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]}{1 - \left[\left(g1 \cdot V24 \cdot V21 + g2 \cdot V24 \cdot V21 \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \left(K2 \cdot d0 \cdot \frac{n}{4} \right)} + \left[g3 \cdot \left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V32) \right] \cdot (1 + V23) \right] + g4 \cdot \left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \right] \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \frac{n}{4}}} \\
 W &= 0.000726580339548 + 0.027335432331199i \\
 G3 &:= \frac{0.5}{(1 + V23) \cdot (1 + V32)} & G4 &:= \frac{0.5}{(1 + V23) \cdot (1 + V32)} \\
 W &:= \frac{\left[\left(G1 \cdot W12 \cdot W24 + G2 \cdot W12 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K2 \cdot d0 \cdot \frac{n}{4}} + \left(G3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 + G4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]}{1 - \left[\left(G1 \cdot V24 \cdot V21 + G2 \cdot V24 \cdot V21 \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \left(K2 \cdot d0 \cdot \frac{n}{4} \right)} + \left[G3 \cdot V21 \cdot (1 + V23) \cdot V34 \cdot (1 + V32) + G4 \cdot V31 \cdot (1 + V32) \cdot V24 \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \frac{n}{4}} \right]} \\
 W &= 0.000728501542223 + 0.027371522685045i \\
 Wmod &:= \sqrt{0.000726580339548^2 + 0.027335432331199^2} \\
 Wmod &= 0.027345086939401
 \end{aligned}$$

Б.3. Розрахунок коефіцієнта проходження для тканини з відсутніми наскрізними порами та із акустичними опорами $Z_2 > Z_3$ ниток основи та утку, які відрізняються між собою

$$\begin{aligned}
 i &:= \sqrt{-1} \quad 1.24 \cdot 331 = 410.44 \\
 z1 &:= 410.44 \quad z2 := 131600 \quad z3 := 62200 \quad z4 := 410.44 \quad K2 := 759.297 \quad K23 := 759.297 \quad d0 := 0.0002 \quad dy := 0.0002 \\
 \\
 W13 &:= \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z3)} \quad V13 := \frac{(z1 - z3)}{(z1 + z3)} \quad W34 := \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z4)} \quad W32 := \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z2)} \quad W23 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z3)} \\
 V12 &:= \frac{(z1 - z2)}{(z1 + z2)} \quad W12 := \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z2)} \quad W24 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z4)} \quad W21 := \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z1)} \quad V34 := \frac{(z3 - z4)}{(z3 + z4)} \\
 V31 &:= \frac{(z3 - z1)}{(z3 + z1)} \quad V24 := \frac{(z2 - z4)}{(z2 + z4)} \quad V21 := \frac{(z2 - z1)}{(z2 + z1)} \quad V23 := \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)} \quad V32 := \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)} \\
 \\
 g1 &:= 0 \quad g2 := 0 \quad g3 := 0.5 \quad g4 := 0.5 \\
 G1 &:= 0 \quad G2 := 0 \\
 \\
 G3 &:= g3 \cdot \frac{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]}{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot (1 + V23) \cdot V34 \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]} \\
 G4 &:= g4 \cdot \frac{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]}{\left[\sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot (1 + V32) \cdot V24 \cdot (1 + V23) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \right]} \\
 \\
 W &:= G3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V21 \cdot V34 \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n + G4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[V31 \cdot V24 \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \\
 \\
 W &= 1.24434760397628 \times 10^{-3} + 0.035763962515967i \\
 \\
 W &:= g3 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n + g4 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[\left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{n}{4}\right)} \right]^n \\
 \\
 W &= 0.001244347603976 + 0.035763962515967i \\
 \\
 W &:= \frac{\left[\left(g1 \cdot W12 \cdot W24 + g2 \cdot W12 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4}} + \left(g3 \cdot 1 \cdot W12 \cdot W23 \cdot W34 + g4 \cdot 1 \cdot W13 \cdot W32 \cdot W24 \right) \cdot e^{i \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} \right]}{1 - \left[\left(g1 \cdot V24 \cdot V21 + g2 \cdot V24 \cdot V21 \right) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \left(K2 \cdot d0 \cdot \frac{1}{4} \right)} + \left[g3 \cdot \left[1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] + g4 \cdot \left[1 - (1 - V31 \cdot V24) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V23) \right] \right] \cdot e^{i \cdot 2 \cdot K23 \cdot (dy + d0) \cdot \frac{1}{4}} \right]} \\
 \\
 W &= 0.001244347603976 + 0.035763962515967i \\
 \\
 W_{mod} &:= \sqrt{0.001244347603976^2 + 0.035763962515967^2} \\
 \\
 W_{mod} &= 0.035785603471271
 \end{aligned}$$

Б.4. Визначення амплітуд ультразвукових хвиль, які пройшли крізь тканини з поверхневою густиною $\eta = 110$ г/м² з різними наскрізними порами

$$p_1(t) := 1 \cdot e^{-\left(2 \cdot \frac{\ln(\sqrt{2})}{0.00004}\right)^2 \cdot t^2} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

$$p_{33}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 - 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (4 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 - 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (4 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$

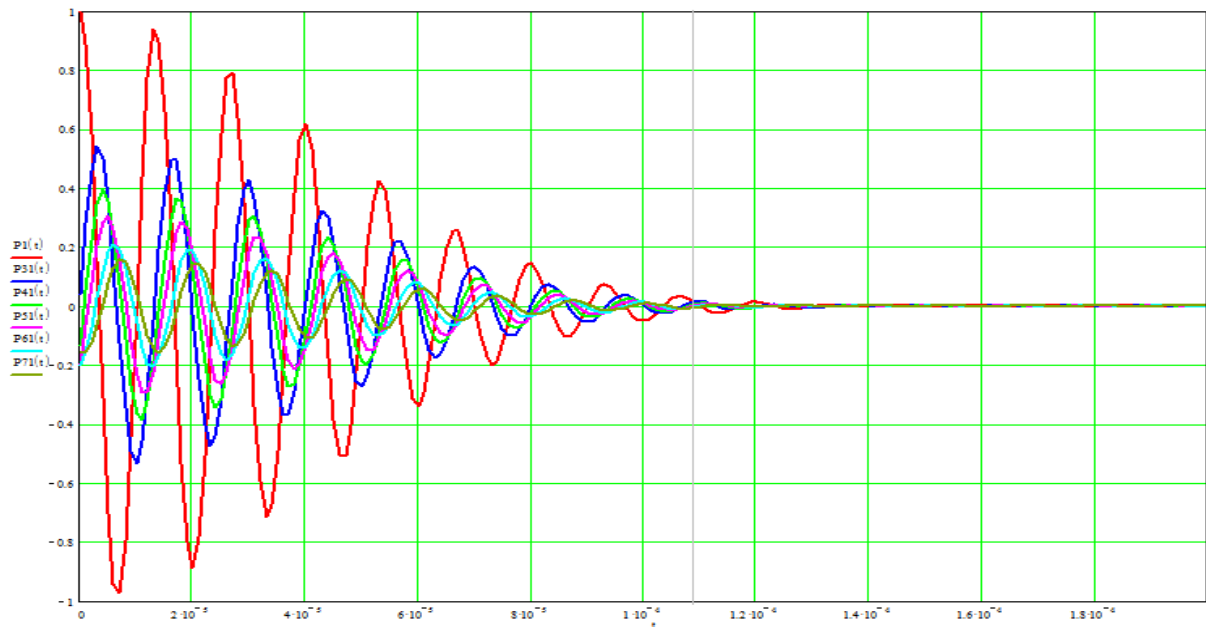
$$p_{31}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (4 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (4 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$

$$p_{41}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (6 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (6 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$

$$p_{51}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (8 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (8 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$

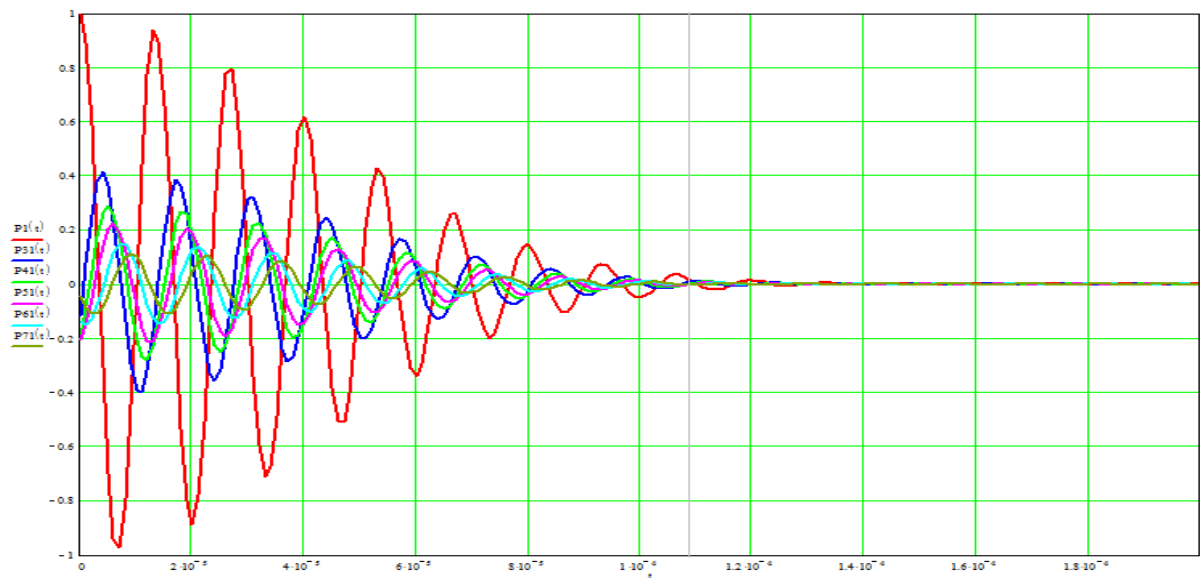
$$p_{61}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (12 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (12 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$

$$p_{71}(t) := \left[\frac{(4 \cdot z_1 \cdot z_2)}{(z_1 + z_2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)} \right]^{2 \cdot n} \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (16 \cdot \eta) \right] \cdot t \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot (16 \cdot \eta)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2} \cdot t^2} \cdot (-1)^{-n} \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}$$



Б.5. Визначення амплітуд ультразвукових хвиль, які пройшли крізь тканини з поверхневою густиною $\eta = 156 \text{ г/м}^2$ з різними наскрізними порами

$$\begin{aligned}
 P1(t) &:= 1 \cdot e^{-\left(\frac{\ln(\sqrt{2})}{0.00004}\right)^2 \cdot t^2} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \\
 P33(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (4 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398} \\
 P31(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (4 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398} \\
 P41(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (6 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398} \\
 P51(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (8 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398} \\
 P61(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (12 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398} \\
 P71(t) &:= \left[\frac{(4 \cdot z1 \cdot z2)}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot \sum_{n=0}^{2000} \left[\frac{(z1 - z2)^{-2 \cdot n}}{(z1 + z2)^2} \right] \cdot 1 \cdot \cos \left[\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right] \cdot t \right] \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{\left[\frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \left[\frac{(\pi \cdot 2 \cdot 75000)}{\omega_0} \right] \cdot 0.00784 + 1}{\pi \cdot 398 \cdot 331} \right]^2 \cdot (16 \cdot 0.156)}{\left[\frac{0.00004}{(2 \cdot \ln(\sqrt{2}))} \right]^2}} \cdot (-1)^{-\alpha \cdot (2 \cdot n + 1) + 0.156} \cdot \frac{0.00784}{\pi \cdot 398}
 \end{aligned}$$



Б.6. Залежності модуля $|W|$ комплексного коефіцієнта проходження від частоти f ультразвукових коливань, при поверхневих густинах тканин

$$\eta = 407,6 \text{ г/м}^2 \text{ та } \eta = 225 \text{ г/м}^2$$

$$\eta := 0.4076$$

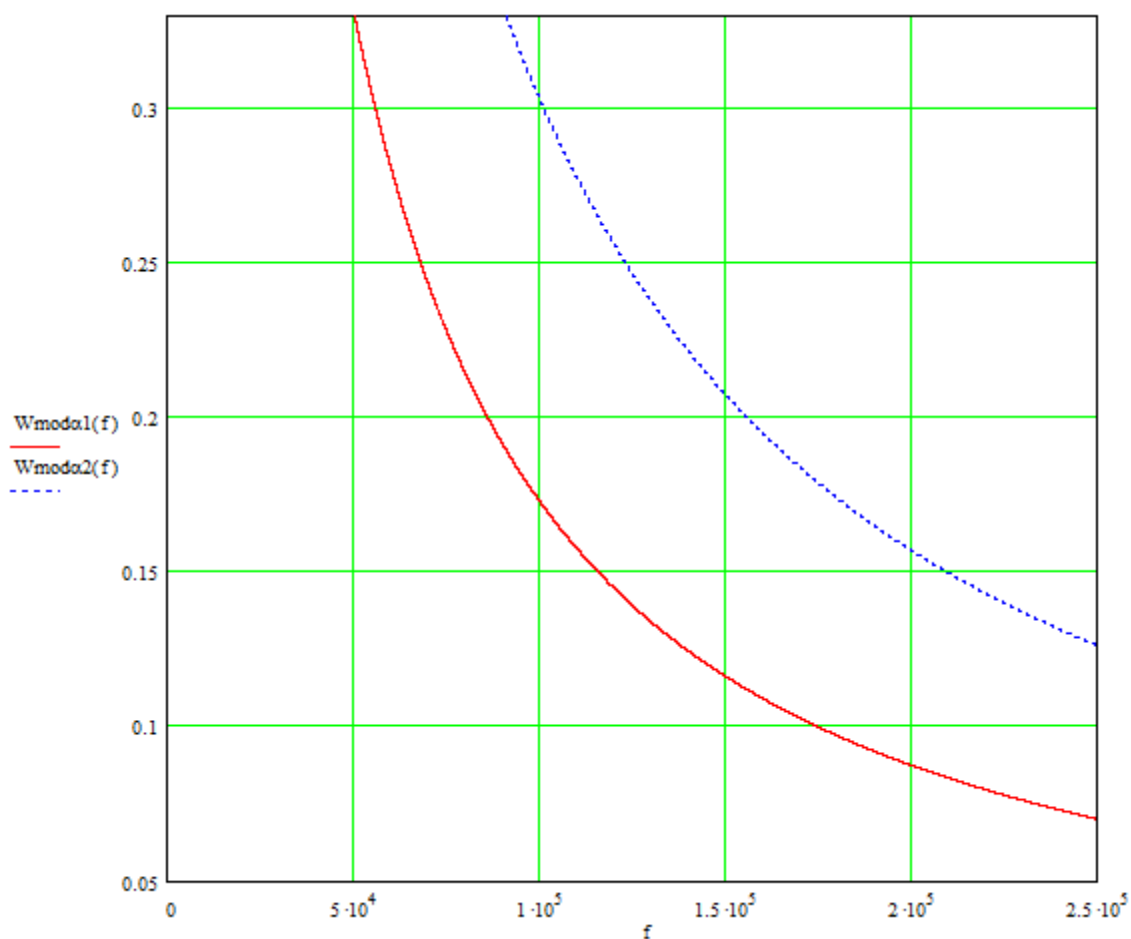
$$f := 40000..250000$$

$$W_{\text{moda1}}(f) := \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha \cdot K \cdot \lambda_2 \cdot \eta \cdot f \cdot \cos v}{2 \cdot \rho_1 \cdot 331 \cdot \pi}\right)^2 + \left(\frac{K \cdot \eta \cdot f \cdot \cos v}{\rho_1 \cdot 331}\right)^2}}$$

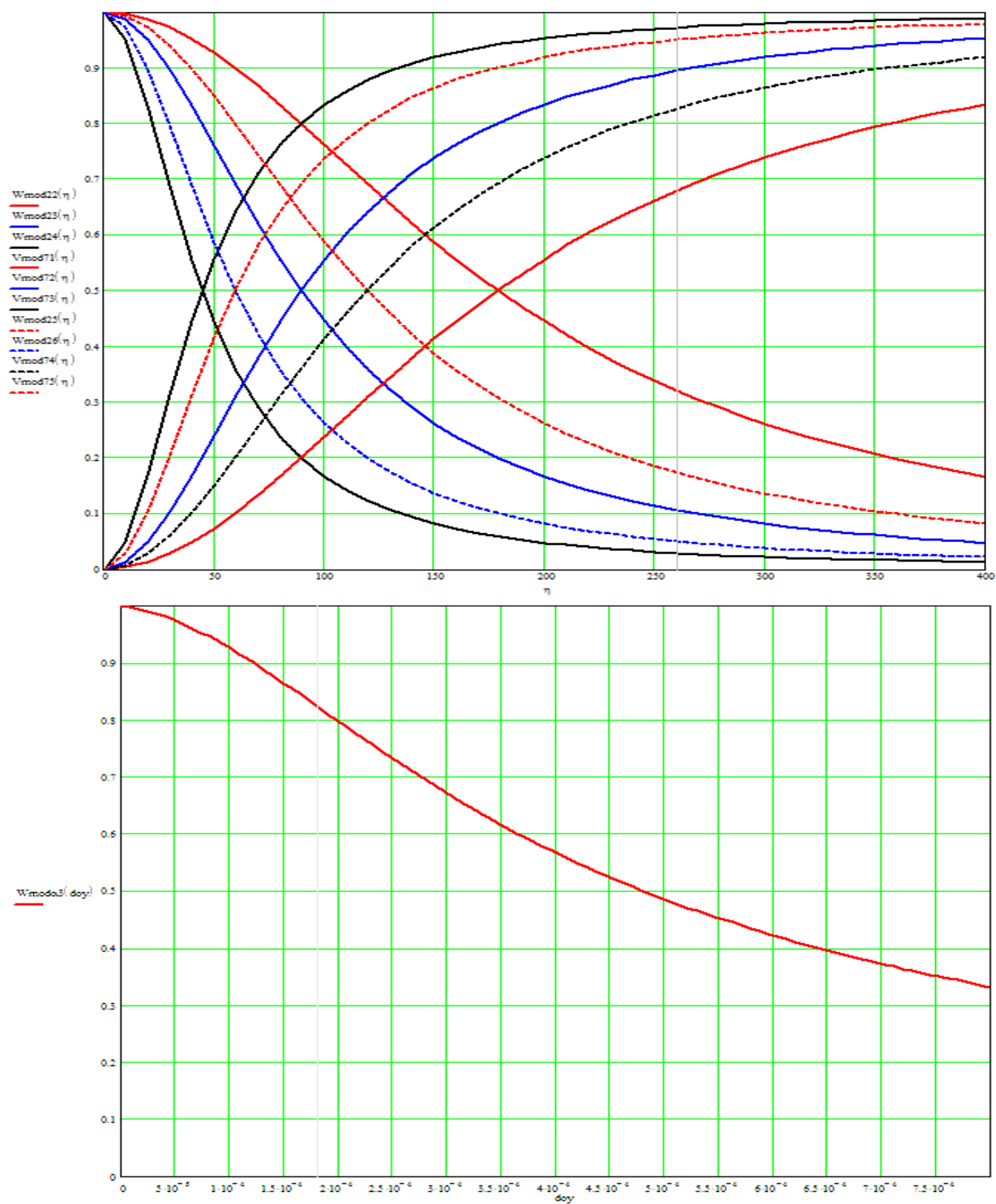
$$\eta := 0.225$$

$$f := 40000..250000$$

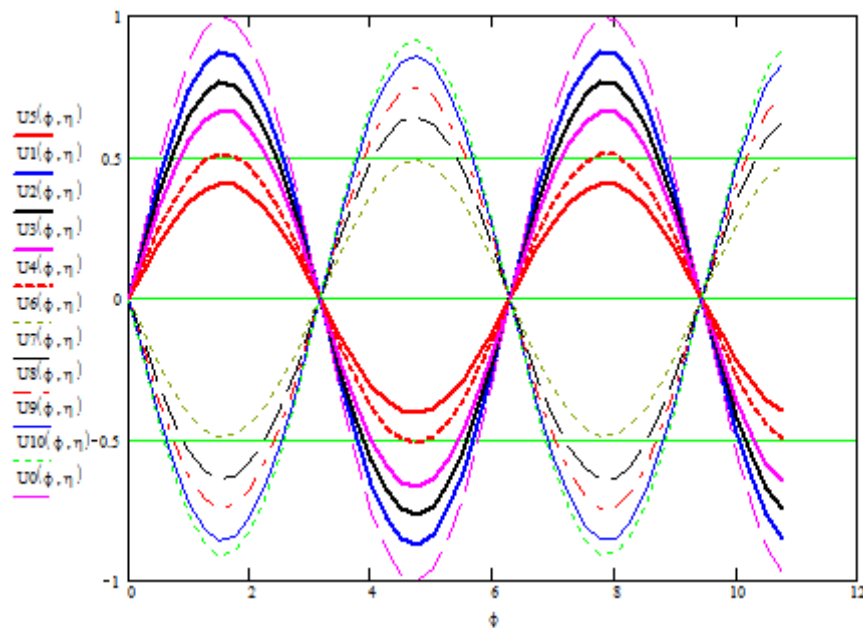
$$W_{\text{moda2}}(f) := \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha \cdot K \cdot \lambda_2 \cdot \eta \cdot f \cdot \cos v}{2 \cdot \rho_1 \cdot 331 \cdot \pi}\right)^2 + \left(\frac{K \cdot \eta \cdot f \cdot \cos v}{\rho_1 \cdot 331}\right)^2}}$$



Б.7. Залежності коефіцієнтів проходження $|W|^2$ та відбиття $|V|^2$ за енергією від поверхневої густини η різних тканин та залежність модуля $|W|$ коефіцієнта проходження від суми діаметрів d_{oy} нитки основи і нитки утку



Б.8. Розрахунок амплітуд ультразвукових хвиль безперервного сигналу, які пройшли крізь різні тканини, хвиль, що відбилися від них, та хвиль, які тільки падають, без врахування затримки коливань



$$U1(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot Wmod22(\eta)$$

$$U6(\phi, \eta) := \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \frac{\pi}{2} + \phi\right) \cdot Vmod71(\eta)$$

$$U2(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot Wmod25(\eta)$$

$$U7(\phi, \eta) := \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \frac{\pi}{2} + \phi\right) \cdot Vmod74(\eta)$$

$$U3(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot Wmod23(\eta)$$

$$U8(\phi, \eta) := \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \frac{\pi}{2} + \phi\right) \cdot Vmod72(\eta)$$

$$U4(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot Wmod26(\eta)$$

$$U9(\phi, \eta) := \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \frac{\pi}{2} + \phi\right) \cdot Vmod75(\eta)$$

$$U5(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot Wmod24(\eta)$$

$$U10(\phi, \eta) := \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \frac{\pi}{2} + \phi\right) \cdot Vmod73(\eta)$$

$$U0(\phi, \eta) := \sin(2 \cdot \pi \cdot 40000 + \phi) \cdot 1$$

ϕ	$U1(\phi, \eta)$	$U2(\phi, \eta)$	$U3(\phi, \eta)$	$U4(\phi, \eta)$	$U5(\phi, \eta)$
0	$3.39 \cdot 10^{-12}$	$2.975 \cdot 10^{-12}$	$2.588 \cdot 10^{-12}$	$-1.987 \cdot 10^{-12}$	$-1.584 \cdot 10^{-12}$
0.25	0.216	0.189	0.165	0.127	0.101
0.5	0.418	0.367	0.319	0.245	0.195
0.75	0.595	0.522	0.454	0.349	0.278
1	0.734	0.644	0.56	0.43	0.343
1.25	0.828	0.727	0.632	0.485	0.387
1.5	0.87	0.764	0.664	0.51	0.407
1.75	0.859	0.753	0.655	0.503	0.401
2	0.793	0.696	0.606	0.465	0.371
2.25	0.679	0.596	0.518	0.398	0.317
2.5	0.522	0.458	0.399	0.308	0.244
2.75	0.333	0.292	0.254	0.195	0.156
3	0.123	0.108	0.094	0.072	0.058
3.25	-0.094	-0.083	-0.072	-0.055	-0.044
3.5	-0.306	-0.269	-0.234	-0.179	-0.143
3.75	-0.499	-0.438	-0.381	-0.292	-0.233

Б.9. Розрахунок модуля $|W|$ коефіцієнта проходження та модуля $|V|$ коефіцієнта відбиття, із врахуванням згасання в нитках ($\alpha = 15 \text{ м}^{-1}$) та без згасання ($\alpha = 0$), а також розрахунок відносних змін $\delta_{|W|}$ та $\delta_{|V|}$, що спричиняються згасанням сигналу

$$\alpha 1 := 15$$

$$W_{\text{mod}11}(\eta) := \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha 1 \cdot 4 \cdot 331 \cdot \eta \cdot 0.00784}{2 \cdot z1 \cdot \pi \cdot 1000}\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot \eta \cdot 0.00784 \cdot 75000}{z1 \cdot 1000}\right)^2}}$$

$$\alpha 1 := 0$$

$$W_{\text{mod}1}(\eta) := \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha 1 \cdot 4 \cdot 331 \cdot \eta \cdot 0.00784}{2 \cdot z1 \cdot \pi \cdot 1000}\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot \eta \cdot 0.00784 \cdot 75000}{z1 \cdot 1000}\right)^2}}$$

$$\Delta W(\eta) := \left[\frac{(W_{\text{mod}11}(\eta) - W_{\text{mod}1}(\eta))}{W_{\text{mod}1}(\eta)} \right] \cdot 100$$

$$\alpha 1 := 15$$

$$V_{\text{mod}111}(\eta) := 1 - \frac{1 + \left(\frac{331}{z1}\right) \cdot \left[\alpha 1 \cdot \left[\frac{(4 \cdot \eta)}{\pi \cdot 1000}\right] \cdot 0.00784\right]}{\left[1 + \left(\frac{331}{z1}\right) \cdot \left[\alpha 1 \cdot \left[\frac{(4 \cdot \eta)}{\pi \cdot 2 \cdot 1000}\right] \cdot 0.00784\right]\right]^2 + \left[\frac{2 \cdot \alpha 1 \cdot f \cdot \left(4 \cdot \frac{\eta}{1000} \cdot 0.00784\right)^2}{398^2 \cdot 331 \cdot \pi} + \frac{[f \cdot (4 \cdot \eta) \cdot 0.00784]}{z1 \cdot 1000}\right]^2}$$

$$\alpha 1 := 0$$

$$V_{\text{mod}1}(\eta) := 1 - \frac{1 + \left(\frac{331}{z1}\right) \cdot \left[\alpha 1 \cdot \left[\frac{(4 \cdot \eta)}{\pi \cdot 1000}\right] \cdot 0.00784\right]}{\left[1 + \left(\frac{331}{z1}\right) \cdot \left[\alpha 1 \cdot \left[\frac{(4 \cdot \eta)}{\pi \cdot 2 \cdot 1000}\right] \cdot 0.00784\right]\right]^2 + \left[\frac{2 \cdot \alpha 1 \cdot f \cdot \left(4 \cdot \frac{\eta}{1000} \cdot 0.00784\right)^2}{398^2 \cdot 331 \cdot \pi} + \frac{[f \cdot (4 \cdot \eta) \cdot 0.00784]}{z1 \cdot 1000}\right]^2}$$

$$\Delta V(\eta) := \left[\frac{(V_{\text{mod}111}(\eta) - V_{\text{mod}1}(\eta))}{V_{\text{mod}1}(\eta)} \right] \cdot 100$$

